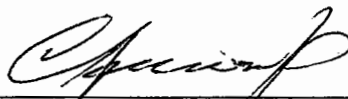


ESTRATÉGIAS ESCALÁVEIS PARA DISTRIBUIÇÃO DE MÍDIAS CONTÍNUAS
SOB DEMANDA EM REDES SEM FIO

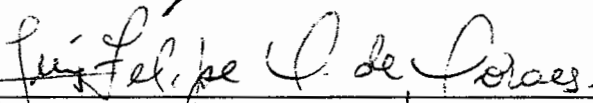
Leonardo Bidese de Pinho

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

Aprovada por:



Prof. Claudio Luis de Amorim, Ph.D.



Prof. Luis Felipe Magalhães de Moraes, Ph.D.



Prof. Felipe Maia Galvão França, Ph.D.



Prof. Edison Ishikawa, D.Sc.



Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2007

PINHO, LEONARDO BIDESE DE

Estratégias Escaláveis para Distribuição de
Mídias Contínuas sob Demanda em Redes sem
Fio [Rio de Janeiro] 2007

XIX, 172 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
Engenharia de Sistemas e Computação, 2007)

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

- 1 - Sistemas Multimídia Escaláveis
- 2 - Vídeo sob Demanda em Redes sem Fio
- 3 - Pontos de Acesso Co-localizados

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

“O problema é que muitas vezes ficamos tão concentrados em pequenos detalhes de implementação que esquecemos o porquê de estarmos aqui ... ‘Por quê’ é tão importante quanto o ‘Como’; eles não são mutuamente exclusivos.”

Harvard Working Knowledge

Agradecimentos

Aos meus pais, Paulo e Mariza, por sempre me incentivarem a ampliar meus conhecimentos, fornecendo todo o suporte afetivo e financeiro durante grande parte desta longa jornada acadêmica; é um privilégio tê-los como principal referência, em todas as fases da vida.

A minha grande pequena esposa Ana, por tudo que ela representa na minha vida – além de uma excelente companheira, é um modelo de vencedora (vê-la superando, dia-a-dia, os obstáculos impostos por uma cidade tão grande e complicada como o Rio de Janeiro, me faz mais forte) – e, em particular, por ser a responsável pela minha mais nova alegria: o fruto do nosso amor que está a caminho; sem o seu apoio, provavelmente este trabalho não teria sido possível.

Aos demais membros da minha família e da Ana, pelo carinho e incentivo de sempre, e a todos meus verdadeiros amigos – citar alguns seria difícil já que, felizmente, são muitos – que, mesmo separados por tão grande distância, não deixaram de entrar em contato, ajudando a superar os momentos em que a saudade de Pelotas bateu mais forte.

Ao meu orientador Claudio Amorim por proporcionar todas as condições necessárias para o desenvolvimento da minha tese e dos outros projetos do LCP onde estive colaborando; além de uma referência técnica, um grande amigo que conquistei ao longo do tempo e com quem pude dividir vários momentos bons e alguns ruins nestes cerca de sete anos de convivência.

Aos meus professores da UCPEL (Adenauer Yamin, Cristiano Costa, Luiz Fernando Meirelles, Paulo Luzardi, Regina Xavier, entre outros), pelo incentivo inicial nesta jornada infundável que é a carreira acadêmica; aos da COPPE/UFRJ (dentre os quais Eliseu Chaves, Inês Dutra, José Rezende, Mario Benevides, Valmir Barbosa e Vítor Costa), por todo o conhecimento repassado e pelo prazer da convivência, tanto no mestrado quanto no doutorado; e aos membros da banca de qualificação e revisores anônimos das conferências e *journals* pelos comentários construtivos que ajudaram a dar substância a esta tese.

Ao meu amigo e sócio Lauro Whately, com quem compartilhei inúmeros momentos agradáveis mas também outros de frustração e de estresse alto; sem a sua presença ao meu lado inúmeras barreiras não teriam sido ultrapassadas, bem como meu poder de argumentação não teria sido tão aprimorado.

Aos meus colegas de sala: Edison Ishikawa, mentor do tema da minha tese de mestrado que, de certo modo, pode ser considerada a base para esta tese de doutorado; Leonardo Bragato, por todos os momentos que passamos juntos para colocar o GloVE em operação e por todos os episódios engraçados que o seu temperamento peculiar proporcionou; João Mauricio Alves, um exemplo profissional e pessoal que contribuiu fundamentalmente em diversos aspectos do cotidiano das pesquisas do LCP e que, na interação diária, me fez uma pessoa melhor; Arthur Granado, que apesar dos poucos meses de contato permitiu-me, devido ao seu grande potencial técnico e pessoal, delegar várias atividades de projetos do LCP sob minha responsabilidade.

Aos demais alunos e colaboradores do LCP, tanto do passado quanto do presente (principalmente ao Diego Dutra, pelo apoio incondicional na reta final deste trabalho), que sempre estiveram disponíveis na hora em que precisei de auxílio e que, mesmo quando me pediram ajuda, me fizeram aprender um pouco mais sobre as diversas áreas em que o LCP atua; aos integrantes do RAVEL envolvidos no projeto TRAVIS, em especial ao prof. Luís Felipe Moraes e ao Carlos Alberto Campos, bem como aos funcionários (em particular as secretárias Claudia, Solange e Sonia, do PESC, e todos os “craques” da Fundação COPPETEC) e alunos da COPPE, em particular do PESC, com quem interagi durante estes oito memoráveis anos de Ilha do Fundão.

Por fim mas não menos importante, é fundamental mencionar o apoio da CAPES durante os dois anos de mestrado e os primeiros quatro de doutorado, e o suporte do CNPq nestes últimos meses, sem os quais este trabalho árduo mas recompensador não teria sido viável.

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

ESTRATÉGIAS ESCALÁVEIS PARA DISTRIBUIÇÃO DE MÍDIAS CONTÍNUAS
SOB DEMANDA EM REDES SEM FIO

Leonardo Bidese de Pinho

Dezembro/2007

Orientador: Claudio Luis de Amorim

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Esta tese propõe o uso de aglomerados (*clusters*) de pontos de acesso (*Access Points - APs*) co-localizados operando em canais sem sobreposição, aliado a mecanismos e políticas de gerenciamento de recursos fornecidos pelos APs, como solução escalável efetiva para distribuição de mídias contínuas sob demanda em redes sem fio. Em particular, é proposto o sistema CINAPS, onde o gerenciamento dos recursos é realizado pelo WCM, componente responsável pelo controle de associação de clientes aos APs, o qual implementa duas novas heurísticas de controle de associação focadas na aplicação, denominadas ERF e BERF, que garantem largura de banda mínima através de mecanismos de reserva de recursos. Estas heurísticas exploram uma característica de VoD conhecida como “Fator de Paciência”, permitindo o uso futuro de canais de comunicação. As principais variáveis do sistema são identificadas e usadas em um modelo que serve de base para a ferramenta de simulação (TCHE) e para o desenvolvimento de um módulo com suporte ao CINAPS para o sistema GloVE de VoD. Os resultados obtidos com TCHE mostraram que o CINAPS, usando as heurísticas focadas na aplicação, superou a heurística genérica LLF com garantias de largura de banda mínima, diminuindo significativamente a rejeição de requisições. De maneira complementar, foi proposto e avaliado o uso combinado de duas técnicas (uma nova e outra adaptada da literatura) efetivas para redução do consumo de energia no CINAPS. Posteriormente, o efeito da distância entre clientes e APs é incorporado ao modelo, dando origem a uma nova heurística consciente da distância, a qual é proposta e avaliada. Em seguida, é investigada uma extrapolação onde CINAPS é usado como bloco básico de uma grade de distribuição, denominada GAPS. Por fim, os resultados simulados são contrastados com resultados práticos coletados com uma ferramenta de emulação de tráfego (WiAssess). A partir deste estudo pioneiro, surgem várias questões de pesquisa, indicando a criação de um novo campo com diferentes caminhos a serem percorridos em trabalhos futuros.

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

SCALABLE STRATEGIES FOR ON DEMAND DELIVERY OF CONTINUOUS
MEDIA OVER WIRELESS NETWORKS

Leonardo Bidese de Pinho

December/2007

Advisor: Claudio Luis de Amorim

Department: Computing and Systems Engineering

This thesis proposes the use of clusters of collocated Access Points (APs) operating in non-overlapping channels, together with mechanisms and policies to manage resources provided by the APs, as an efficient scalable solution for continuous media distribution over wireless networks. In particular, it introduces the CINAPS system, whose resource manager called WCM performs the association control of clients to the APs, using two novel application-friendly heuristics, namely Early Released First (ERF) and Bounded ERF (BERF). Such heuristics exploit the Patience Factor, which is a slack of time that VoD applications provide to allow the association control unit to accept requests for using the communication channels in the near future. The main system variables are identified and used to build a model taken as the basis for implementing a simulation tool known as TCHE and for developing a CINAPS module for the GloVE VoD system. The results provided by TCHE showed that CINAPS, using application-friendly heuristics, outperformed the generic LLF (Least Loaded First) heuristic with minimum bandwidth guarantees, by decreasing significantly the overall blockage rate of video requests. Moreover, the behavior of power consumption in the wireless NICs is analyzed and the usage of a combination of two effective power saving techniques (a novel one and another adapted from the literature) in CINAPS is proposed and evaluated. Also, the impact of the distance between clients and APs is incorporated into the model so that a new distance-aware heuristic is proposed and evaluated as well. Afterwards, an extended approach is investigated where CINAPS is used as the basic block of a distribution grid, namely GAPS. Finally, such findings are discussed in conjunction with practical results collected using the WiAssess tool built to emulate the expected traffic that will be generated by GloVE with the CINAPS extension. As a novel study, several other research directions are pointed out, indicating that a new field has been actually established with many different tracks to be followed on as future works.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.1.1	Desafios de Sistemas VoD: escalabilidade e mobilidade	3
1.1.2	Tendência em Redes sem Fio: IEEE 802.11	5
1.1.3	Largura de Banda Dispersa: Importância do Gerenciamento	7
1.2	Motivação	8
1.2.1	Propostas	8
1.2.2	Cenários de Aplicação	10
1.3	Metodologia	11
1.4	Contribuições	12
1.5	Organização da Tese	13
2	Conhecimentos Básicos	15
2.1	Distribuição de Mídias Contínuas	15
2.1.1	Mídias Contínuas	15
2.1.1.1	Padrões de Compressão	16
2.1.1.2	Modelos de Transmissão	17
2.1.2	Modos de Distribuição de Mídia Contínua	18
2.1.3	Vídeo sob Demanda	19
2.1.3.1	Componentes Básicos de Sistemas VoD	19
2.1.3.2	Categorias	21
2.1.3.3	Abordagem Proativa X Reativa	22
2.1.3.4	Modelo <i>Push</i> X <i>Pull</i>	22
2.1.4	Paradigma Cliente/Servidor X <i>Peer-to-Peer</i>	23
2.1.5	Técnicas de Reuso de Fluxo	24
2.1.5.1	Técnicas Proativas	24
2.1.5.2	Técnicas Reativas	25

2.2	Redes sem Fio	26
2.2.1	Visão Geral	27
2.2.1.1	Compartilhamento do Meio Físico	27
2.2.1.2	Qualidade de Serviço	28
2.2.2	Redes IEEE 802.11	29
2.2.2.1	Arquiteturas WLAN	33
2.2.2.2	Pontos de Acesso Co-localizados	33
2.2.2.3	Controle de Associação	34
2.3	Considerações Finais	36
3	Sistema VoD Escalável com Pontos de Acesso Co-localizados	39
3.1	Modelo do Sistema SWVoD com APs Co-localizados	40
3.1.1	Controle de Associação Genérico em SWVoD	40
3.1.2	Premissas	41
3.2	Proposta do Sistema Básico	43
3.2.1	Visão Geral do Sistema	43
3.2.2	Procedimento de Controle de Associação	46
3.2.3	Operação Interna do WCM com Alocação Imediata	46
3.3	Análise Experimental	47
3.3.1	Metodologia de Avaliação	48
3.3.2	Cenário de Simulação	48
3.3.3	Avaliação de Desempenho	49
3.4	Considerações Finais	53
4	Sistema com Heurísticas Focadas na Aplicação	55
4.1	Controle de Associação Focado na Aplicação	56
4.2	Proposta do Sistema CINAPS	56
4.2.1	Procedimento de Controle de Associação Estendido	56
4.2.2	Operação Interna do WCM com Alocação Preguiçosa	57
4.3	Análise Experimental	60
4.3.1	Metodologia de Avaliação	61
4.3.2	Avaliação de Desempenho	61
4.4	Considerações Finais	67

5	Sistema Consciente do Consumo de Energia	69
5.1	Consumo de Energia no CINAPS	70
5.1.1	Modelo de Consumo de Energia	70
5.1.2	Técnicas para Redução de Consumo	73
5.1.3	Níveis de Otimização do <i>Power-aware</i> CINAPS	73
5.2	Análise Experimental	74
5.2.1	Experimentos Base	74
5.2.2	Resultados de Consumo de Energia	75
5.3	Considerações Finais	80
6	Sistema Consciente da Distância	82
6.1	Heurística Consciente da Distância	83
6.2	Análise Experimental	84
6.2.1	Extensão para Simulação de Área de Cobertura	84
6.2.1.1	Cálculo de <i>CAC</i> e <i>CAD</i>	85
6.2.2	Cenário de Simulação	87
6.2.3	Avaliação de Desempenho	88
6.2.3.1	Taxa de Bloqueio Ideal	88
6.2.3.2	Taxa de Bloqueio Efetiva	90
6.2.3.3	Abordagem Adaptativa	90
6.3	Considerações Finais	95
7	Sistema de Distribuição em Grade	96
7.1	Proposta do Sistema GAPS	98
7.1.1	Supervisor de WCMs	99
7.1.1.1	<i>Grid</i> Estático	100
7.1.1.2	<i>Grid</i> Dinâmico	100
7.2	Análise Experimental	101
7.2.1	Cenário de Simulação	101
7.2.2	Extensão da Ferramenta de Simulação	103
7.2.3	Parâmetros de Simulação	103
7.2.4	Métricas de Desempenho	104
7.2.5	Avaliação de Desempenho	105
7.2.5.1	Análise de Escalabilidade	105
7.2.5.2	Análise de Custo-Receita	108

7.3	Considerações Finais	111
8	Validação Empírica	114
8.1	Ambiente de Testes	114
8.2	Metodologia Experimental	115
8.2.1	Vazão Efetiva dos Modos de Transmissão	116
8.2.2	Experimento Base	117
8.2.3	Efeito da Interferência entre Canais Adjacentes	117
8.2.4	Impacto da Potência de Transmissão dos Clientes	118
8.2.5	Impacto da Potência de Transmissão dos APs	121
8.2.6	Topologia <i>stack-like</i>	123
8.3	Experimentos de Troca de Canal	125
8.4	Considerações Finais	127
9	Discussão	129
9.1	Considerações Finais	134
10	Trabalhos Relacionados	137
10.1	Sistemas VoD para WLAN	137
10.2	Redes sem Fio	138
10.2.1	Controle de Associação	138
10.2.2	Sincronização de APs	139
10.2.3	Agregação de Canais	139
10.2.4	Redes <i>Mesh</i>	140
10.2.5	Consumo de Energia	140
10.2.6	Ajuste de Modo de Transmissão	140
10.2.7	Interferência entre Canais Adjacentes	141
10.3	Considerações Finais	142
11	Conclusões e Trabalhos Futuros	144
11.1	Conclusões	144
11.2	Trabalhos Futuros	147
	Referências Bibliográficas	150
	Apêndice	160

A Ferramenta TCHE	160
B Ferramenta WiAssess	163
C Protótipo GloVE-CINAPS	166
C.1 Sistema GloVE	166
C.2 Novo Módulo SGG-WCM	167
C.2.1 Modificações na Dinâmica do SGG	167
C.2.2 Modificações na Dinâmica do Cliente	169
D Resultados Parciais de Pesquisa	171
E Trabalhos em VoD no LCP	172

Lista de Figuras

1.1	Modelo de distribuição de VoD escalável para MANs e WANs	4
2.1	Efeito do <i>long tail</i> no acesso aos vídeos	18
2.2	Necessidade de <i>buffer</i> no cliente	20
2.3	Distribuição de metadados e dados entre os componentes do sistema . . .	24
2.4	Família de padrões 802 da IEEE	30
2.5	Modos de transmissão do 802.11a	30
2.6	Variações do DCF sem e com RTS/CTS	31
2.7	Máscara de espectro definida no suplemento do 802.11a	32
2.8	Pontos de acesso co-localizados	34
3.1	Componentes de <i>hardware</i>	44
3.2	Componentes de <i>software</i>	45
3.3	Protocolo básico usado na sinalização	46
3.4	Pseudo-código do WCM usado no gerenciamento de requisições	47
3.5	Impacto de λ e AP_{total} em BR para V_{length} de 60, 600 e 1200 s	50
3.6	Impacto de λ e AP_{total} em OR para V_{length} de 60, 600 e 1200 s	51
3.7	Limite imposto pela duração do vídeo com alta taxa de chegada	53
4.1	Protocolo de controle de associação estendido	57
4.2	Pseudo-código do algoritmo usado pelo WCM no CINAPS	61
4.3	Influência de V_{length} nas métricas de desempenho para as três heurísticas .	64
4.4	Influência de λ nas métricas de desempenho para as três heurísticas . . .	65
4.5	Influência de AP_{total} nas métricas de desempenho para as três heurísticas	66
5.1	Influência do Fator de Paciência na taxa de bloqueio	76
5.2	Influência do Fator de Paciência na latência média de serviço	77
5.3	Influência da duração do vídeo no consumo médio de energia	78
5.4	Influência da taxa de requisições no consumo médio de energia	79

6.1	Casos particulares da relação AS x ACA	85
6.2	Condições especiais de cálculo de ACR	86
6.3	Taxa de bloqueio ideal para os três modos de maior vazão do 802.11a . . .	89
6.4	Impacto de V_{length} e λ na taxa de bloqueio obtida por DBERF, com diferentes áreas de simulação e alcances, em um <i>cluster</i> de 12 APs	91
6.5	Influência dos modos de transmissão em DBERF para $V_{length} = 300$ s . . .	92
6.6	Influência dos modos de transmissão em DBERF para $V_{length} = 600$ s . . .	92
6.7	Influência dos modos de transmissão em DBERF para $V_{length} = 900$ s . . .	93
6.8	Influência dos modos de transmissão em DBERF para $V_{length} = 1200$ s . . .	93
7.1	Comparação de diferentes instalações usando CINAPS e GAPS	99
7.2	Arquitetura de <i>software</i> do CINAPS e do GAPS	100
7.3	GAPS estático de quatro <i>clusters</i> com 3 APs cada para três padrões de concentração de clientes	102
7.4	GAPS dinâmico de quatro <i>clusters</i> com diferentes quantidades de APs ativos dependendo do padrão de concentração de clientes	103
7.5	Resultados comparativos de CINAPS e GAPS ($AS = 100 \times 100$ m ² e $AP_{throughput} = 21$ Mbps - 30 m / 16 Mbps - 60 m) com o caso ideal	106
7.6	Impacto do CCP em um GAPS estático ($AS = 100 \times 100$ m ² e $ALC = 30$ m) com quatro <i>clusters</i> de três APs cada para diferentes V_{length}	109
7.7	Influência de quantidade dinâmica de APs por <i>cluster</i> em um GAPS dinâmico ($AS = 100 \times 100$ m ² e $ALC = 30$ m) para diferentes V_{length} e distribuições de APs: (A) 3+3+3+3 (CCP = 25%); (B) 6+2+2+2 (CCP = 50%); e (C) 9+1+1+1 (CCP = 75%)	110
8.1	Ambiente de testes montado no LCP/COPPE/UFRJ	116
8.2	Resultados obtidos através da rede cabeada	117
8.3	Topologia <i>star-like</i>	118
8.4	Resultados obtidos com a topologia <i>star-like</i> (Modo 6)	119
8.5	Resultados para variações na P_{tx} dos clientes (Modo 6)	120
8.6	Resultados para APs configurados com a máxima (18 dBm) P_{tx} (Modo 6) . . .	121
8.7	Resultados para APs configurados com 1/2 (-3 dB) da P_{tx} (Modo 6)	121
8.8	Resultados para APs configurados com 1/4 (-6 dB) da P_{tx} (Modo 6)	122
8.9	Resultados para APs configurados com 1/4 (-6 dB) da P_{tx} (Modo 8)	122
8.10	Resultados para APs configurados com 1/8 (-9 dB) da P_{tx} (Modo 8)	122

8.11	Topologia <i>stack-like</i>	123
8.12	Topologia complexa	124
9.1	Vazão efetiva de diferentes modos do 802.11a em função da distância . . .	134
A.1	Componentes da ferramenta de simulação	161
B.1	Fluxogramas simplificados das versões de WiAssess Client	165
E.1	Trabalhos desenvolvidos no LCP envolvendo VoD	172

Lista de Tabelas

2.1	Aplicação inicial dos padrões MPEG	16
2.2	Aplicações de VoD	19
3.1	Parâmetros de Simulação	49
3.2	Mínima taxa de chegada (MAR) onde $R_{denied} > 0$	52
4.1	Parâmetros de Simulação	62
4.2	Taxa de bloqueio máxima ($MaxBR$)	67
5.1	Parâmetros da Simulação	74
6.1	Combinações de AS e ALC investigadas	87
6.2	Parâmetros da Simulação	88
6.3	Taxa de bloqueio média (ABR)	94
7.1	Coefficiente de Área Descoberta (CAD) para AS e ALC avaliadas	104
7.2	Parâmetros da Simulação	104
7.3	ABR de um CINAPS de 12 APs com clientes uniformemente distribuídos	107
7.4	ABR de um GAPS de quatro <i>clusters</i> de 3 APs cada com clientes unifor- memente distribuídos	107
7.5	ABR de um GAPS estático de quatro <i>clusters</i> de 3 APs cada para dife- rentes CCPs	108
D.1	Período relacionado aos resultados	171

Lista de Símbolos

Seguem abaixo os principais símbolos adotados no texto.

AB - Aggregate Bandwidth
ABR - Average Blockage Rate
AC - Association Control
ACA - Área de Cobertura Absoluta
ACI - Adjacent Channel Interference
ACK - Acknowledgment
ACR - Área de Cobertura Relativa
AL - Average Latency - Latência média de serviço de requisições aceitas
ALC - Alcance efetivo de transmissão
AP - Access Point - Ponto de Acesso
 $AP_{throughput_i}$ - vazão do iésimo AP
 AP_{total} - número de APs co-localizados
APID - id de um determinado AP
AS - Área de Simulação
AVC - Advanced Video Coding
BERF - Bounded ERF
BR - Blockage Rate - Taxa de bloqueio de requisições
BSS - Basic Service Set
 C_{ap_i} - AP ao qual o iésimo cliente é associado
 C_{video_i} - id do vídeo requisitado pelo iésimo cliente
CA - Collision Avoidance
CAC - Coeficiente de Área Coberta
CAD - Coeficiente de Área Descoberta
CCA - Clear Channel Assessment
CCP - Client Concentration Pattern
CD - Collision Detection
CDN - Content Distribution Network
CID - id de um determinado cliente
CINAPS - Cluster of Inexpensive Access PointS
CM - Continuous Media
CSMA - Carrier Sense Multiple Access
CTS - Clear To Send
DiscoverEAP - Procedimento de descoberta do *EAP*
DBERF - Distance-aware BERF
DCF - Distributed Coordination Function
DVD - Digital Versatile Disk
EAP - Earliest AP - AP que mais cedo liberará uma determinada largura de banda

ERF - Early Released First
ESS - Extended Service Set
FreeBandwidth - vetor usado pelo WCM no gerenciamento de carga dos APs
FEC - Forward Error Correction
GloVE - Global Video Environment
GAPS - Grid of collocated Access PointS
IVoD - Interactive VoD
L_{expire_{CID}} - instante de tempo no qual a largura de banda alocada ao cliente CID é liberada
L_{period} - período de tempo em que a largura de banda fica alocada para um cliente
LAN - Local Area Network
LLF - Least Loaded First
LLF+ - LLF com reserva de largura de banda
MAC - Medium Access Control
MAN - Metropolitan Area Network
MAR - Minimum Arrival Rate - Taxa de chegada mínima com requisições bloqueadas
Max_{channels} - número máximo de canais sem sobreposição
MaxAP_{throughput} - vazão efetiva máxima dos APs
MaxBR - Maximum Blockage Rate - Taxa de bloqueio máxima
MaxV_{length} - duração máxima dos vídeos
MaxV_{rate} - taxa máxima de reprodução dos vídeos
MinAP_{throughput} - vazão efetiva mínima dos APs
MinV_{length} - duração mínima dos vídeos
MinV_{rate} - taxa mínima de reprodução dos vídeos
MPEG - Moving Picture Experts Group
NoVoD - No VoD
NAV - Network Allocation Vector
NVoD - Near VoD
OR - Occupation Rate - Taxa de ocupação dos APs
P_{idle} - Potência no modo idle
P_{off} - Potência no modo off
P_{receive} - Potência no modo receive
P_{sleep} - Potência no modo sleep
P_{total} - Consumo médio de energia
P_{AS} - Consumo médio de energia a partir do início da recepção do vídeo
P_{AS_{bursty}} - *P_{AS}* com o uso da técnica bursty transmission
P_{BS} - Consumo médio de energia antes do início da recepção do vídeo
P_{BS_{delayed}} - *P_{BS}* com a utilização da técnica delayed reassociation
Prefetch_i - período de pré-busca (*prefetch*) do iésimo cliente
Prx - Potência de recepção
Ptx - Potência de transmissão
P2P - Peer-to-Peer
PCF - Point Coordination Function
PDA - Portable Digital Assistant
PDU - Protocol Data Unit
PER - Packet Error Rate
PF - Patience Factor
PHR - Potential Hourly Revenue
PHY - Physical
PL_i - latência de exibição (*playback latency*) do iésimo cliente (função de *SL_iePrefetch_i*)

PMNI - Potential Monthly Net Income
PPT - Potential Payback Time
QoS - Quality of Service
R_{accepted} - total de requisições aceitas pelo sistema ao longo da simulação
R_{denied} - total de requisições negadas/bloqueadas/rejeitadas no decorrer da simulação
R_{total} - total de requisições realizadas durante a simulação
RSSI - Receive Signal Strength Indicator
RTS - Request To Send
SL - Service Latency
SL_i - latência de serviço do *i*ésimo cliente
SSF - Strongest Signal First
STA - Station
SWVoD - Scalable Wireless VoD
T_{idle} - Período de tempo operando em modo idle
T_{receive} - Período de tempo operando em modo receive
T_{request_i} - instante de tempo em que o *i*ésimo cliente requisito o vídeo
T_{service_i} - intervalo entre a requisição e o início do envio do vídeo para o *i*ésimo cliente
T_{sleep} - Período de tempo em que pode operar no modo sleep
TCHÉ - Transmission of Continuous media over Hybrid Environments
TS - Simulation Time - Tempo de Simulação
TVoD - True VoD
UDP - User Datagram Protocol
UHM - Usage Hours in a Month
V_{length_i} - duração do *i*ésimo vídeo
V_{rate_i} - taxa do *i*ésimo vídeo
V_{total} - número de vídeos
VoD - Video on Demand
VCR - Video Cassette Recorder
VID - id de um determinado vídeo
VP - Video Player
VS - Video Server
WiAssess - Wireless Assessment
WAN - Wide Area Network
WCM - Wireless Channel Manager
WCMS - WCM Supervisor
WIC - Wireless Infrastructure Cost
WLAN - Wireless LAN
WNIC - Wireless Network Interface Card
WTP - Wireless Termination Point
 α - desvio da distribuição Zipf referente a popularidade dos vídeos
 λ - taxa de chegada de requisições em um processo de Poisson

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo apresenta, inicialmente, o contexto da tese e, em particular, a sua principal motivação: avaliar a hipótese de que aglomerados (*clusters*) de pontos de acesso (*Access Points* - APs) co-localizados podem ser uma solução efetiva para sistemas de distribuição de mídias contínuas sob demanda em redes sem fio, e investigar questões decorrentes da sua utilização (já que, como será mostrado, a simples aglomeração dos APs não resolve o problema em cenários de alta densidade de clientes, exigindo mecanismos e políticas complementares que permitam um uso eficiente dos recursos proporcionados pelos APs). Em seguida, descreve o método adotado no desenvolvimento da tese e salienta, de forma resumida, as principais contribuições para o estado-da-arte resultantes deste trabalho. Por fim, é exposta a organização adotada para os demais capítulos que completam esta tese.

1.1 Contexto

Notoriamente, aplicações multimídia¹ estão entre as mais requisitadas pelos usuários, com destaque para áudio e vídeo, denominadas de Mídias Contínuas (*Continuous Media* - CMs). Conceitualmente, CMs abrangem mídias que necessitam ser exibidas durante um determinado intervalo de tempo, normalmente com alguma interação do usuário [85]. De maneira análoga, CMs são definidas como sendo caracterizadas tanto por grande volume de dados quanto por apresentar tempo contínuo de reprodução [51].

Embora exista demanda crescente por acesso a mídias contínuas, suas características intrínsecas tornam a construção de sistemas efetivos de distribuição uma tarefa não trivial. Dentre os fatores, salienta-se a demanda de grande largura de banda² para sua trans-

¹O termo “multimídia” refere-se a representação de modos mistos de informação - textos, dados, imagens, áudio e vídeo - como sinais digitais [48].

²Nesta tese são utilizados como sinônimos os termos “largura de banda” e “largura de faixa”.

missão. Por exemplo, a simples transmissão de um fluxo (*stream*) de vídeo de alta resolução, mesmo que compactado segundo algum padrão de compressão otimizado, consome recursos significativos do servidor multimídia e da rede de distribuição, durante todo o período de exibição. Além do alto consumo de largura de banda, o gerenciamento de *streams* de vídeo envolve aspectos de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS), principalmente no que se refere a continuidade de exibição. Ou seja, devem ser oferecidas garantias para que o conteúdo chegue no destino a tempo de ser decodificado, evitando assim que haja interrupção na exibição. A questão se complica ainda mais quando junto ao fluxo de vídeo existe um fluxo de áudio, e ambos devem ser exibidos de forma sincronizada. Em virtude disto, pode-se argumentar que a análise do comportamento de um sistema de transmissão de conteúdo multimídia³ pode ser facilmente extrapolada para transmissão de CM em geral.

Em particular, uma aplicação que desperta grande interesse e desafio, envolvendo transmissão de conteúdo multimídia, é Vídeo sob Demanda (*Video on Demand* - VoD). Sistemas VoD convencionais permitem que diferentes clientes escolham exemplares do seu acervo a qualquer hora e que comecem a assisti-los pouco tempo depois da seleção, como se estivessem em uma vídeo locadora eletrônica virtual. Genericamente, esses exemplares podem ser vistos como arquivos multimídia compostos por áudio e vídeo comprimidos segundo um padrão conhecido. Sistemas VoD convencionais estabelecem um fluxo de vídeo para cada cliente, o que pode requerer um elevado investimento em *hardware*, com custo proporcional à audiência esperada. Portanto, para minimizar a relação custo/audiência, é fundamental adotar estratégias que utilizem os recursos de *hardware* eficientemente. Neste sentido, nos últimos anos foram propostas e amplamente estudadas diversas estratégias para VoD no contexto de redes cabeadas⁴.

Na prática, do ponto de vista dos engenheiros de sistemas, existe uma corrida sem fim onde o principal objetivo é casar da melhor forma possível o estado-da-arte em tecnologia de redes com as características da aplicação de VoD de modo que o sistema VoD resultante ofereça a melhor experiência para grandes audiências. Especificamente, para produzir e viabilizar um projeto de sistema VoD custo-efetivo, os engenheiros precisam lidar com três principais questões: suporte às funcionalidades básicas de VoD, escolha do hardware mais indicado dentre os disponíveis no mercado, e emprego de uma política eficiente de gerenciamento de recursos.

³Neste texto utiliza-se o termo “conteúdo multimídia” como referência ao conteúdo composto por áudio e vídeo.

⁴Nesta tese são considerados equivalentes os termos “redes cabeadas”, “redes fixas” e “redes com fio”.

1.1.1 Desafios de Sistemas VoD: escalabilidade e mobilidade

No contexto de sistemas VoD para redes cabeadas, vários trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo principal de aumentar a escalabilidade – capacidade de atendimento a clientes simultâneos em função dos recursos empregados (i.e. o sistema é considerado escalável quando a sua capacidade de atendimento a clientes pode ser aumentada com a inclusão de mais recursos; além disso, quanto maior for o crescimento da capacidade em relação ao aumento na quantidade de recursos, mais eficiente – ou mais escalável – é considerado o sistema⁵).

Em particular, sistemas VoD *Peer-to-Peer* (P2P) baseados em técnicas de reuso de fluxo mostraram-se escaláveis em redes locais (*Local Area Networks* - LANs) que utilizam comutadores (*switches*) como dispositivos de interconexão, onde a largura de banda existente entre os clientes é abundante [71, 72, 62, 66]. Para redes metropolitanas (*Metropolitan Area Networks* - MANs) e de grande escala (*Wide Area Networks* - WANs), especialmente quando a tecnologia empregada na rede de acesso restringe a largura de banda entre clientes, as técnicas baseadas em *proxies*⁶ demonstraram ser a melhor escolha, pois elas aumentam a escalabilidade dos sistemas VoD principalmente quando os *proxies* são colocados nas bordas de redes de distribuição de conteúdo (*Content Distribution Networks* - CDNs) [42], como mostra a Figura 1.1.

Sob a perspectiva da rede de comunicação, VoD pode ser vista como uma aplicação regular, considerando o seu típico modo de operação: (i) o cliente requisita um vídeo da lista de títulos disponíveis; (ii) um fluxo de vídeo⁷ é transmitido pelo servidor⁸ com uma vazão igual a taxa média de consumo do decodificador de vídeo usado pelo cliente; (iii) enquanto o cliente assiste o vídeo, a largura de banda mencionada permanece alocada para o cliente durante um período de tempo igual a duração do vídeo.

Hipoteticamente, em um sistema verdadeiramente de VoD (*True VoD* - TVoD)⁹, as requisições dos clientes são atendidas imediatamente e os pacotes de vídeo são transmitidos do servidor para o cliente através de uma rede sem *jitter* e sem atraso (latência) de en-

⁵Na Seção 9.1 é apresentada uma definição mais precisa sobre escalabilidade e eficiência.

⁶Servidores secundários posicionados entre o servidor central do sistema e os clientes (*three-tier VoD architecture*), os quais, sempre que possível, substituem o servidor central na tarefa de prover o fluxo de vídeo para os clientes.

⁷Suavizado através de um *buffer* de exibição no cliente, o qual permite que vídeos de taxa variável (*Variable bit-rate* - VBR) sejam tratados pelo sistema como vídeos de taxa constante (*Constant bit-rate* - CBR) no que tange a alocação de largura de banda, além de servir para esconder as variações estatísticas na latência da rede (*jitter*).

⁸Operando em modo *push*, explicado no Capítulo 2.

⁹Ver classificação de sistemas VoD exposta no capítulo a seguir.

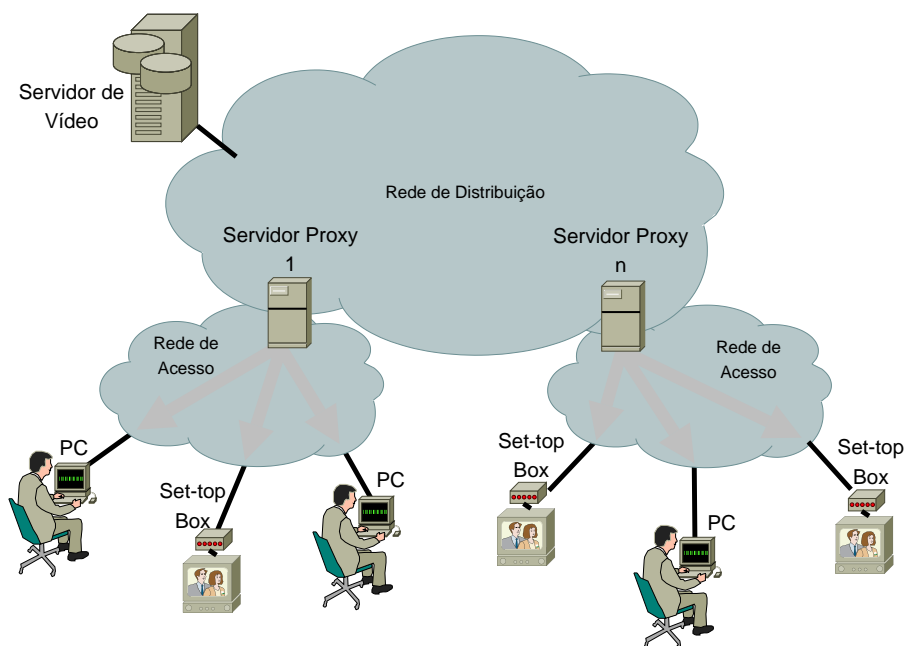


Figura 1.1: Modelo de distribuição de VoD escalável para MANs e WANs

vio. No entanto, em sistemas reais, os clientes sempre experimentam algum atraso entre a requisição e o início da exibição do vídeo. Este atraso, chamado de latência de exibição, pode ser dividido em três componentes: 1) latência de serviço, que corresponde ao período de tempo entre a requisição do vídeo e o final da alocação dos recursos necessários para a disponibilização do fluxo de vídeo para o cliente; 2) latência de rede, relativa ao tempo que o primeiro pacote de vídeo leva para percorrer a rede e chegar até o *buffer* do cliente; e 3) latência de pré-busca (*prefetch*), definida pelo tempo necessário para encher o *buffer* de exibição do cliente permitindo compensar as variações, tanto da latência da rede quanto da taxa com que o vídeo é consumido. Em termos práticos, assumindo que a latência de rede e de *prefetch* estão no seu valor mínimo, um sistema é considerado TVoD quando atinge latência de serviço (*Service Latency - SL*) próxima de zero.

Conforme aumenta-se a disponibilidade de aplicações baseadas em VoD, cresce também a necessidade de acesso ubíquo a elas já que cada vez mais pessoas passam a usar dispositivos móveis – também chamados de estações (*stations - STA*) – dotados de recursos suficientes para exibir vídeos (*laptops*, PDAs, telefones celulares de última geração, *smartphones*, entre outros) e desejam ter acesso às aplicações em qualquer lugar, a qualquer hora. Redes sem fio podem ser a resposta para esta necessidade crescente. Entretanto, o suporte do sistema por trás das aplicações VoD precisa ser escalável para atender uma demanda crescente de acessos concorrentes (implicando na necessidade de trans-

missão simultânea de uma quantidade potencialmente grande de fluxos de vídeos, mesmo que iniciados em momentos distintos), ao mesmo tempo em que garanta qualidade de serviço.

O exemplo prático que segue, passível de extrapolação para vários outros ambientes e aplicações, ajuda a ilustrar o potencial e o desafio de disponibilização de sistemas VoD: pessoas em uma praça de alimentação de *shopping center*. Neste ambiente, o sistema VoD pode ser usado como uma ferramenta de *marketing*, através do qual poderiam ser transmitidos principalmente vídeos curtos sobre os produtos em promoção nas lojas do *shopping*, trailers de filmes em cartaz no cinema, notícias sobre vários assuntos, entretenimento em geral, e assim por diante. Por exemplo, para utilizar este serviço, o usuário poderia acessar o *website* do *shopping* onde encontraria um *link* para *download* do *software* cliente de vídeo, caso este ainda não tenha sido instalado no seu dispositivo. Isto seria feito através da rede sem fio disponibilizada pelo *shopping* para acesso gratuito a Internet, separada da rede de vídeo. Ou seja, haveriam duas redes independentes, uma específica para vídeo e outra de propósito geral. Assim sendo, ao ser inicializado, o *software* cliente atualizaria a lista de vídeos disponíveis através da rede de propósito geral e, quando um determinado vídeo fosse selecionado para exibição, este seria recebido através da rede de vídeo dedicada ao sistema VoD. Como a área da praça de alimentação usualmente concentra muita pessoas, especialmente na hora do almoço e do jantar, fica claro que o sistema precisa ser escalável para atender uma quantidade eventualmente grande de clientes. Além disso, o sistema VoD deve grande parte dos usuários potenciais, de modo que ele necessita ser baseado em tecnologias sem fio amplamente adotadas.

1.1.2 Tendência em Redes sem Fio: IEEE 802.11

Em particular, a disseminação de equipamentos para redes locais sem fio (*Wireless Local Area Networks* - WLANs) vêm crescendo significativamente nos últimos anos, sendo o padrão IEEE 802.11 o padrão de fato do mercado. Apesar da existência de uma infraestrutura para comunicação sem fio consolidada, a perspectiva para o futuro é de disseminação ainda maior desse tipo de tecnologia.

A especificação do padrão 802.11 define as camadas física (*Physical* - PHY) e de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) para WLANs. Na camada PHY, os principais padrões são: “a”, “b”, e “g”, onde cada um destes três padrões definem vários modos de transmissão [54], os quais ditam a taxa de dados, o esquema de modulação e o esquema de controle de erros (ex.: FEC), se for o caso. A parte experimental

desta tese se concentrará no estudo das variantes de maior vazão, “a” e “g”, operando com pontos de acesso (*Access Points* - APs)¹⁰, ou seja, no modo infra-estruturado [33].

É importante notar que é cada vez mais comum encontrar interfaces de rede 802.11 configuráveis¹¹, capazes de operar em múltiplos padrões, conforme a necessidade da aplicação ou do ambiente. Esta tendência, que é explorada nesta tese, sugere a possibilidade de desenvolver mecanismos de software que permitam comutar as interfaces entre os diferentes padrões, conforme uma política global concebida para utilizar os canais independentes fornecidos por estes padrões de forma balanceada, otimizando o uso de recursos para atender aos requisitos das aplicações.

Na camada MAC, os principais mecanismos são: um protocolo de acesso baseado em contenção, denominado *Distributed Coordination Function* (DCF), que é implementado obrigatoriamente, e um protocolo opcional, baseado em *polling*, conhecido como *Point Coordination Function* (PCF), raramente implementado nos dispositivos comercializados nos últimos anos [60]. O DCF fornece um nível de QoS baseado em melhor esforço, sem garantias de largura de banda, que tenta evitar colisões mas não garante que elas não ocorrerão.

No que se refere à largura de banda, enquanto o 802.11g oferece apenas três canais capazes de coexistir sem interferência, operando na faixa de 2,4 GHz, o 802.11a suporta até treze canais (dependendo das regulamentações vigentes no país) independentes, utilizando a faixa de 5 GHz. Como consequência, é teoricamente possível agregar as capacidades destes canais, de modo que pode-se ter dezesseis canais paralelos em uma mesma área de cobertura, utilizando para isso APs co-localizados (*collocated APs*)¹². Embora cada canal de “a” e “g” tenha 54 Mbps de taxa máxima de *link*, a vazão máxima efetiva usando UDP é próxima a 30,7 Mbps [56], o que acarreta em uma largura de banda agregada total de 491,2 Mbps. Além disso, é interessante notar que esta vazão é proporcional a alcançada efetivamente por interfaces *gigabit ethernet*, as quais são freqüentemente usadas em soluções de VoD baseadas em *proxies* [16, 78]. Devido às características expostas, o padrão 802.11 pode ser visto como um potencial candidato para uso em rede de acesso em sistemas de distribuição de VoD, especialmente onde o suporte a estações móveis e

¹⁰O AP funciona como um concentrador (*hub*), manipulando todo o tráfego do canal sem fio (tanto interno, entre dispositivos móveis operando no mesmo canal, quanto externo, funcionando como uma ponte (*bridge*) para a rede cabeada onde o AP está conectado).

¹¹Dentre eles as da 3COM, utilizando *chipset* da Atheros [12].

¹²APs posicionados significativamente próximos uns dos outros, com a mesma área de cobertura, usando diferentes canais sem sobreposição de freqüência entre si.

portáteis¹³ é considerado um requisito fundamental.

1.1.3 Largura de Banda Dispersa: Importância do Gerenciamento

Embora a largura de banda agregada oferecida por pontos de acesso co-localizados seja significativa, as variantes do padrão 802.11 não dispõem de um mecanismo eficiente que otimize o uso dos pontos de acesso. Especificamente, o 802.11 requer um procedimento adequado para a escolha do AP onde o dispositivo do cliente deve ser associado quando este adentra a área de cobertura de múltiplos APs, sejam estes co-localizados ou não, operando em canais não sobrepostos. Na literatura, este procedimento é denominado “controle de associação” (*Association Control - AC*). A heurística básica adotada no 802.11 para AC é conhecida como *Strongest Signal First (SSF)*, caracterizada por priorizar a escolha de APs de acordo com o indicador de intensidade do sinal (*Receive Signal Strength Indicator - RSSI*). Porém, diversos trabalhos¹⁴ mostram que a SSF frequentemente atinge um insuficiente balanceamento de carga (uso dos canais) entre os APs, além de não prover garantias de largura de banda mínima. Em particular, quando aplicado em APs co-localizados, a SSF tende a apresentar um comportamento aleatório pois todos os APs estarão na mesma distância em relação aos clientes. Além da SSF, outra heurística amplamente adotada em soluções proprietárias e não interoperáveis é a denominada *Least Loaded First (LLF)*. Na LLF, um cliente que entra na rede se associa ao AP com maior largura de banda disponível. Embora a LLF otimize o uso dos APs [14], a falta de interoperabilidade entre diferentes marcas de equipamentos sem fio restringe a eficiência da LLF. Além disso, alguns fabricantes estenderam a LLF para suportar aplicações que requeiram garantia de largura de banda mínima, exacerbando ainda mais o problema de interoperabilidade. Note que estas heurísticas são genéricas nos sentidos de que elas foram projetadas sem ter uma aplicação alvo. Como resultado, elas tendem a ser incapazes de explorar as singularidades de certas aplicações para melhorar a utilização dos recursos providos pelos APs.

¹³Por definição, uma estação portátil é aquela que pode ser movida de um local para outro, mas que só é usada em um local fixo. Enquanto isso, estações móveis são aquelas que acessam a rede em movimento. Ambos tipos de estação são atendidos pelo padrão 802.11 [33].

¹⁴Referenciados no capítulo que trata de redes sem fio.

1.2 Motivação

Tendo em vista o contexto apresentado acima, a motivação desta tese advém do fato de não ter sido encontrado, durante a vasta pesquisa bibliográfica efetuada, nenhum outro trabalho significativo que avalie o desempenho de sistemas de VoD que explore eficientemente a largura de banda agregada disponibilizada por APs co-localizados. Nem mesmo um que utilize extensões da heurística de controle de associação LLF para prover garantias de largura de banda mínima, necessárias para viabilizar sistemas VoD sobre WLANs baseadas no padrão 802.11. Além disso, as heurísticas encontradas na literatura que oferecerem suporte a largura de banda mínima são genéricas no sentido de que não objetivam explorar as singularidades das aplicações para melhorar o seu desempenho.

1.2.1 Propostas

Partindo desta motivação, é inicialmente proposto e avaliado o desempenho de um sistema VoD composto por APs co-localizados básico¹⁵, baseado na heurística LLF, levemente modificada para prover garantia de largura de banda mínima. A heurística resultante (LLF+) é aplicada em um modelo de sistema de VoD usando APs co-localizados. A avaliação experimental deste modelo mostrou que, apesar de usar efetivamente a largura de banda agregada, o sistema baseado na heurística LLF+ conseguia atender com sucesso apenas cenários com vídeos curtos ou com taxa de chegada de requisições moderada, apresentando fraco desempenho (i.é., crescente quantidade de requisições bloqueadas) quando a duração do vídeo ou a taxa de chegada aumentava.

Usando como base os resultados obtidos com o sistema básico, foi realizado um estudo focado no desenvolvimento de novas heurísticas de controle de associação que se beneficiassem das características particulares das aplicações de VoD para aumentar a eficiência do sistema. Como resultado deste estudo¹⁶, propôs-se o sistema CINAPS (*Cluster of Inexpensive Access Points*) através do qual foram introduzidas e avaliadas duas novas heurísticas de controle de associação focadas na aplicação, denominadas *Early Release First* (ERF), que dava prioridade de escolha ao canal que teria largura de banda liberada mais cedo, e *Bounded ERF* (BERF), que foi uma versão de ERF com limitação de espera máxima, as quais garantem largura de banda mínima através de mecanismos de reserva de

¹⁵Publicado inicialmente como relatório técnico do PESC [64] e aceito posteriormente para publicação como artigo completo na conferência LANOMS 2005 [65], onde foi escolhido como um dos cinco melhores trabalhos e cuja versão estendida foi aceita para publicação no JNSM em 2008 [70].

¹⁶Publicado inicialmente como relatório técnico do PESC [63] e aceito posteriormente como artigo completo na conferência ICN 2006 [67].

recursos. Estas heurísticas exploraram uma característica de VoD conhecida como “Fator de Paciência” (*Patience Factor* - PF) dos usuários, permitindo que a unidade de controle de associação aceitasse requisições para alocação futura de canais de comunicação.

Tendo em vista a significância da questão de consumo de energia em ambientes que envolvam dispositivos móveis, foi proposto e avaliado o uso combinado de duas técnicas que reduziram efetivamente o consumo médio de energia das interfaces 802.11 no *Power-aware CINAPS*, versão do CINAPS consciente do consumo de energia e que opera com a heurística BERF¹⁷. A primeira delas, *Delayed Reassociation*, introduzida nesta tese, explora a latência de serviço imposta pela heurística de controle de associação durante momentos de escassez de recursos, e a segunda, *Bursty Transmission*, adaptada da literatura [17], beneficia-se da extensão do período ocioso contíguo entre a recepção de pacotes.

Posteriormente, foi estudado o impacto da posição dos clientes no desempenho do CINAPS com 802.11a, contemplando diferentes modos de transmissão e tamanhos de área, buscando soluções de compromisso entre alcance e vazão agregada proporcionada. Para isso, é proposta e avaliada uma nova heurística, chamada de *Distance-aware BERF* (DBERF), que agregou a consciência da distância à heurística BERF, comparando inclusive o desempenho obtido com duas abordagens de escolha de modo de transmissão: estática e dinâmica¹⁸.

Como a distância possui um impacto significativo no modo de transmissão, estratégias que permitam operar com os modos de maior vazão tendem a maximizar a vazão agregada do sistema. Buscando explorar esta característica, foi proposta e avaliada uma nova arquitetura, denominada de GAPS (*Grid of collocated Access PointS*), na qual o CINAPS é usado como bloco básico de uma grade de distribuição, onde cada bloco básico é responsável por uma área distinta e a quantidade de APs ativos por área pode ser configurada estaticamente ou dinamicamente, conforme o padrão de concentração de clientes (*Client Concentration Pattern* - CCP)¹⁹.

Por fim, são apresentados resultados de experimentos práticos obtidos em um ambiente de testes real construído no Laboratório de Computação Paralela (LCP) da COPPE/UFRJ, os quais confirmam as principais premissas assumidas nos projetos propostos, reforçando a viabilidade do uso de pontos de acesso co-localizados como solução escalável eficiente para sistemas VoD em redes sem fio.

¹⁷Publicado como artigo completo na conferência SBRC 2006 [69].

¹⁸Publicado como artigo completo na conferência WEBMEDIA 2006 [68].

¹⁹Artigo aguardando submissão para conferência/journal internacional.

1.2.2 Cenários de Aplicação

Para concluir, cabe ressaltar que, conforme exposto acima, já existem soluções na literatura capazes de “remover” os gargalos nos sistemas de distribuição, mas apenas até a rede de acesso (Figura 1.1), também conhecida como “última milha” (*last-mile*). Entretanto, quando a “última milha” é baseada nas variantes mais comuns da tecnologia 802.11, “a, b e g”, a eficácia das soluções passa a depender do cenário de aplicação.

No caso onde uma rede sem fio é utilizada para cobrir uma área grande, através de múltiplos APs interconectados por rede cabeada e posicionados estrategicamente de modo que toda a área seja coberta (por exemplo, um campus, um hotel, entre outros), apesar da densidade de usuários por AP ser baixa, o total de usuários concorrentes acessando um servidor de VoD conectado a rede cabeada pode ser grande e crescente. Neste caso, as soluções escaláveis desenvolvidas anteriormente para o contexto de redes cabeadas podem ser empregadas, com pequenas modificações principalmente relacionadas a diferença no protocolo mais comumente adotado na camada MAC dos APs 802.11, o DCF. Como este protocolo não oferece QoS, é necessário que a aplicação consiga adequar-se a esta limitação. O primeiro passo é evitar que existam múltiplas estações tentando transmitir no meio compartilhado. Portanto, os sistemas P2P que se mostravam os mais adequados para LANs, intuitivamente não são a melhor escolha para o caso de WLANs, de modo que o problema da escalabilidade pode ser resolvido com soluções baseadas em *proxies*, complementadas com um tratamento diferenciado das perdas de pacote (que acontecem em número mais significativo nas redes 802.11), desde que a quantidade de fluxos de vídeo enviados simultaneamente para os usuários através de um determinado AP não exceda a capacidade do canal.

No caso oposto, onde a área que se deseja cobrir é menor, com alta densidade, o uso de *proxies* não resolve o problema. Nestes cenários, as variantes de 802.11 mencionadas tornam-se o “gargalo”. Apesar de permitirem a utilização de múltiplos pontos de acesso cobrindo a mesma área, mas usando canais diferentes não sobrepostos em frequência, os padrões não fornecem mecanismos efetivos para gerenciar a largura de banda agregada disponível nos múltiplos APs. Para resolver esta limitação, os mecanismos e políticas propostos nesta tese, mencionados na subseção anterior, mostram-se fundamentais para explorar pioneiramente a utilização de pontos de acesso de forma co-localizada, fornecendo uma largura de banda agregada variável, proporcional ao número de APs.

Assim sendo, neste trabalho é atribuído um novo enfoque para o uso de múltiplos

APs, voltado para escalabilidade, inspirado pelas estratégias de aglomeração de computadores convencionais de baixo custo (produzidos em larga escala) para alcançar alto desempenho. De forma análoga, considerando as características das variantes do 802.11, vislumbrou-se a possibilidade de agregar, em uma mesma área, diversos pontos de acesso operando em canais distintos (sem sobreposição de frequência). Assumindo que não há interferência significativa entre os canais, ocorre uma soma de capacidade de vazão dos APs, oferecendo como consequência uma alta disponibilidade de largura de banda agregada, tornando factível o atendimento simultâneo de uma quantidade grande de clientes em aplicações que façam uso significativo de recursos da rede sem fio.

1.3 Metodologia

Conforme exposto no contexto e nas motivações, o tema desta tese pode ser resumido pelo seu título: “Estratégias Escaláveis para Distribuição de Mídias Contínuas em Redes sem Fio”. Em particular, optou-se por concentrar o foco na análise de um subproblema – sistemas de vídeo sob demanda em redes 802.11 infra-estruturadas – e, a partir das soluções propostas e avaliadas, discutir eventuais generalizações.

Nesta direção, esta tese objetiva validar a seguinte hipótese básica, não encontrada na revisão bibliográfica realizada: “o uso de aglomerados (*clusters*) de pontos de acesso co-localizados, em conjunto com mecanismos e políticas de gerenciamento de recursos conscientes da aplicação, constitui-se em uma solução escalável eficiente para sistemas de VoD em redes 802.11 infra-estruturadas”. Para avaliar esta hipótese, bem como as demais hipóteses derivadas, foram adotadas duas abordagens – simulada e prática – buscando uma validação recíproca.

Para a simulação foi desenvolvida a ferramenta TCHE (*Transmission of Continuous Media over Hybrid Environments*) que emula a interação entre os principais componentes presentes no ambiente alvo – servidor de vídeo, clientes, pontos de acesso, gerenciador de recursos e *links* parametrizados.

Já a abordagem prática foi dividida em duas: implementação de emulador e protótipo. A implementação do emulador, denominado WiAssess (*Wireless Assessment*), foi necessária para permitir a avaliação do comportamento do ambiente de APs co-localizados com perfil de tráfego similar ao esperado para o protótipo real – um servidor centralizado parametrizado capaz de escalonar a transmissão de fluxos UDP para os clientes associados aos APs co-localizados, contabilizando a taxa de pacotes recebidos e perdidos em um

determinado intervalo de tempo. Paralelamente, a implementação do protótipo foi planejada como uma extensão para o sistema GloVE (*Global Video Environment*) de VoD para redes cabeadas desenvolvido em trabalhos anteriores.

Além disso, optou-se por aproveitar a oportunidade de obter *feedback* de revisores anônimos nas diversas fases de desenvolvimento desta tese (Apêndice D), através de submissões de artigos com inovação incremental. Conforme os resultados obtidos, a originalidade do trabalho realizado não foi questionada, tanto em âmbito nacional quanto internacional.

1.4 Contribuições

Em resumo, as principais contribuições – parte delas publicadas em [63, 65, 64, 69, 68, 67, 70] – presentes nesta tese são:

1. Modelagem do problema do controle de associação em um sistema de distribuição de mídia contínua, em particular de vídeo sob demanda, empregado em WLANs compostas por APs co-localizados, focando no comportamento dos clientes;
2. Proposta e avaliação de um novo projeto para sistemas VoD operando sobre redes 802.11 que utiliza eficientemente a largura de banda agregada de APs co-localizados, ao mesmo tempo que provê garantias de largura de banda mínima através de mecanismos de reserva atrelados ao procedimento de controle de associação usando a heurística LLF+;
3. Proposta e avaliação do CINAPS, através do qual são introduzidas duas novas heurísticas de controle de associação focadas na aplicação, denominadas ERF e BERF, que aproveitam o “Fator de Paciência” das aplicações de VoD que permite à unidade de controle de associação aceitar requisições para uso futuro dos canais de comunicação sem fio;
4. Avaliação simulada detalhada do sistema CINAPS comparando o desempenho de uma heurística de controle de associação genérica com as duas novas heurísticas focadas na aplicação;
5. Modelagem do consumo de energia no CINAPS usando a heurística BERF de controle de associação;

6. Proposta e avaliação do *Power-aware* CINAPS – versão do CINAPS incorporando as técnicas de redução de consumo de energia *Delayed reassociation*, introduzida nesta tese, e *Bursty transmission*, adaptada da literatura;
7. Proposta e avaliação, para diferentes modos de transmissão do 802.11a e vários tamanhos de área, de uma nova versão do sistema CINAPS consciente da distância entre clientes e o *cluster* de APs;
8. Investigação da eficácia de um esquema adaptativo de escolha do modo de transmissão para a redução da taxa de bloqueio média;
9. Proposta e avaliação da arquitetura GAPS – extensão de CINAPS com múltiplos *clusters* formando um *grid*;
10. Comparação de desempenho entre GAPS usando quatro *clusters* e CINAPS para os dois modos de transmissão de maior vazão efetiva do 802.11a em cenários onde os clientes estão uniformemente distribuídos pela área;
11. Estudo do desempenho potencial de esquemas estáticos e dinâmicos de GAPS para diferentes padrões de concentração de clientes;
12. Validação de resultados de simulação através de resultados experimentais práticos obtidos com a ferramenta de emulação implementada;
13. Protótipo do CINAPS implementado como extensão do sistema GloVE de VoD.

1.5 Organização da Tese

Além do Capítulo 1, esta tese é composta por outros dez capítulos e pelo apêndice, organizados da seguinte forma.

No Capítulo 2 são abordados os principais conceitos relacionados a distribuição de mídias contínuas, especialmente os relacionados a sistemas de vídeo sob demanda, além de aspectos relevantes de redes sem fio, focando no padrão IEEE 802.11, utilizado como tecnologia de referência.

No Capítulo 3 é proposto e avaliado o modelo básico de uso de pontos de acesso localizados para constituir sistemas escaláveis de VoD em redes sem fio, contemplando a modelagem do problema, especificação da arquitetura de *hardware/software* e o protocolo de sinalização, baseado na heurística genérica LLF+.

No Capítulo 4, são propostas e avaliadas duas heurísticas focadas na aplicação, ERF e BERF, usadas na concepção do sistema CINAPS.

No Capítulo 5, é estudado o comportamento do sistema proposto com a heurística BERF sob o ponto de vista de consumo de energia; o uso combinado de duas técnicas, uma nova e outra adaptada da literatura, é proposto e avaliado com o objetivo de reduzir o consumo nas interfaces de rede sem fio.

No Capítulo 6, o impacto da distância entre clientes e APs – que afeta o comportamento dos diferentes modos de transmissão do 802.11 – é incorporado ao modelo e uma nova heurística consciente da distância é proposta e avaliada.

No Capítulo 7, é proposta e avaliada uma extrapolação da proposta original onde múltiplas unidades do CINAPS são empregadas em conjunto para a formação de uma grade (*grid*) de distribuição capaz de otimizar a vazão agregada disponibilizada pelos canais não sobrepostos do 802.11.

No Capítulo 8, são apresentados resultados coletados através de experimentos práticos realizados em um ambiente de testes criado no Laboratório de Computação Paralela (LCP) do PESC/COPPE, especificamente para a validação de parte das premissas assumidas na tese, corroborando a viabilidade prática do uso de APs co-localizados em canais sem sobreposição.

No Capítulo 9, são discutidas as principais descobertas – pontos fortes e fracos – considerando o ambiente estudado, bem como a potencial generalização destas para outros cenários.

No Capítulo 10, são brevemente caracterizados os trabalhos relacionados e contrastados com aspectos desta tese.

No Capítulo 11, são apresentadas as conclusões e potenciais trabalhos futuros.

Por fim, no apêndice são fornecidos detalhes sobre a implementação das ferramentas – TCHE (Apêndice A), de simulação do sistema, e WiAssess (Apêndice B), de emulação de tráfego – e do protótipo – GloVE-CINAPS (Apêndice C), módulo que estende as funcionalidades do sistema GloVE de VoD com suporte ao CINAPS –, uma visão geral sobre o desenvolvimento desta tese (Apêndice D), mostrando os resultados parciais obtidos durante as pesquisas, bem como de outras teses relacionadas a VoD (Apêndice E) desenvolvidas pelo grupo de multimídia do LCP.

Capítulo 2

Conhecimentos Básicos

Este capítulo tem por objetivo explicitar conceitos, definições e questões envolvidas nesta tese, especialmente em relação aos dois principais aspectos que permeiam a proposta: distribuição de mídias contínuas e redes sem fio. Após, são apresentadas considerações finais, encadeando os conteúdos abordados para delimitar o contexto da tese.

2.1 Distribuição de Mídias Contínuas

Nesta seção são descritos, de maneira geral, os aspectos relacionados à distribuição de mídias contínuas, a qual compõe o nosso objeto de pesquisa. A seguir, o foco é concentrado em uma de suas aplicações, conhecida como vídeo sob demanda, abordando questões conceituais dos seus sistemas de distribuição, bem como as técnicas que representam o estado-da-arte no tocante a uma de suas principais limitações, a escalabilidade das soluções de distribuição.

2.1.1 Mídias Contínuas

O termo Mídia Contínua (*Continuous Media* - CM) abrange mídias que necessitam ser exibidas, em modo síncrono, durante um determinado intervalo de tempo, normalmente com alguma interação do usuário [85]. A combinação de múltiplas CM forma um conteúdo multimídia¹, costumeiramente composto por áudio e vídeo, os quais demandam grande largura de banda para sua transmissão. Por exemplo, para efetuar uma transmissão digital estéreo de um CD de áudio, são necessários 1,411 Mbps, o que representa uma quantidade suficiente para saturar uma linha T1². Em relação a vídeo, tomando como

¹Nesta tese, considera-se mídia contínua e conteúdo multimídia composto por áudio e vídeo como sinônimos, muitas vezes referenciados apenas pela palavra conteúdo.

²Padrão de linha de transmissão com vazão de 1,544 Mbps.

Padrão	Aplicação
MPEG-1	CD-ROM e <i>links</i> T1 a 1,5 Mbps
MPEG-2	DVD e Transmissão de TV Digital entre 4 e 9 Mbps
MPEG-3	HDTV entre 20 e 40 Mbps (abandonado)
MPEG-4	Vídeofone, correio de vídeo, videoconferência e videogames

Tabela 2.1: Aplicação inicial dos padrões MPEG

exemplo a abordagem mais simples de transmissão digital que se baseia na exibição de quadros formados por uma matriz de *pixels*, onde é necessário exibir pelo menos 25 quadros/s para evitar a impressão de congelamento nos movimentos mostrados nas imagens, um monitor configurado no padrão XGA (1024x768) com 24 bits por *pixel* demanda 472 Mbps, duas ordens de grandeza em relação a áudio. Desta forma, fica claro que técnicas capazes de compactar mídia contínua mantendo a qualidade de visualização e estratégias escaláveis de transmissão são aspectos fundamentais para a construção de sistemas de acesso à mídia contínua eficientes, os quais são abordados a seguir.

2.1.1.1 Padrões de Compressão

Compressão é a ciência de reduzir a quantidade de dados usados para armazenar informação [83], explorando fortemente a eliminação de redundância existente nos dados. No que concerne ao vídeo, existem duas fontes de redundância a serem exploradas: espacial (intra-imagem) e temporal (interimagens). O formato amplamente adotado para transmissão de conteúdo multimídia comprimida segue os padrões MPEG, assim conhecidos por terem sido estabelecidos por um comitê técnico composto por membros da ISO e IEC denominado *Moving Picture Experts Group*, formado em 1988. Seu objetivo inicial era o de criar um padrão para codificação de vídeos com taxas de aproximadamente 1,5 Mbps, apropriado para o transporte através de circuitos de dados T1 e capaz de ser exibido a partir de um CD-ROM [83]. Note que, na prática, isto significa transmitir áudio e vídeo ocupando a mesma largura de banda necessária para transmitir um CD de áudio. No transcorrer dos anos, esse grupo definiu vários padrões, buscando atender a determinados nichos de aplicações, parte destes consolidados na Tabela 2.1 [7].

Enquanto o padrão MPEG-1 praticamente caiu em desuso, o MPEG-2 é amplamente empregado em diversas aplicações atuais. Por exemplo, é adotado em diversos padrões de transmissão de TV digital e nos *Digital Video (Versatile) Disks* (DVDs). Embora não tenha sido concebido com este fim, o MPEG-4 tem sido considerado como o substituto

natural do MPEG-2 em novas gerações de produtos, devido ao seu melhor desempenho de compressão e robustez no que se refere a transmissão [76].

Outros padrões que merecem atenção são o H.261 e H.263, amplamente usados em ferramentas de videoconferência. Estes padrões foram definidos por um grupo de trabalho pertencente ao *International Telecommunication Union Telecommunication Standardisation Sector* (ITU-T), denominado *Video Coding Experts Group* (VCEG). Cabe ressaltar que o H.263 foi usado como base para a formatação do *MPEG-4 Visual*, componente vídeo do padrão MPEG-4 originalmente publicado em 1999. Recentemente, foi desenvolvido um novo padrão que atinge ainda maior compressão de imagens de vídeo, denominado *Advanced Video Coding* (AVC), sendo este publicado conjuntamente como *ISO/IEC MPEG-4 Part 10 e ITU-T H.264*.

2.1.1.2 Modelos de Transmissão

Durante anos, as transmissões *unicast*, onde o fluxo de dados é recebido apenas por um cliente, dominaram os ambientes de rede. Desta forma, o número de clientes atendidos fica limitado pelo valor máximo de fluxos simultâneos imposto pela largura de banda da rede, podendo ser bastante baixo dependendo da taxa de bits dos fluxos. Devido ao crescente aumento no uso de aplicações que demandam grande largura de banda (exemplo: transmissão de mídia contínua), tornou-se necessário adotar soluções de transmissão mais escaláveis, capazes de explorar o fato de que, em determinadas aplicações, diversos clientes buscam o mesmo conteúdo em um curto intervalo de tempo.

A forma mais simples de compartilhar a transmissão nos casos onde ocorre concentração de acessos a determinados conteúdos é através de *broadcast*, onde o fluxo de dados é recebido simultaneamente por todos os clientes. Esta abordagem não é eficiente porque clientes passam a receber dados desnecessários, já que normalmente um mesmo conteúdo é desejado por um grupo de clientes, e não por todos eles. Devido a isso, tornou-se necessário desenvolver um serviço seletivo de transmissão, onde os fluxos sejam recebidos apenas por aqueles clientes que demonstrem interesse pelo conteúdo. Assim, surgiu em 1993 a primeira implementação de *multicast* na camada de rede, incorporada ao 4.4 BSD ???. Este tipo de transmissão apresenta um comportamento semelhante a rádio e televisão no sentido de que quando um cliente quer receber um determinado conteúdo, basta a ele sintonizar um canal. A partir deste momento, passa a receber as informações sendo enviadas para tal canal pela estação transmissora. Nesta analogia, um canal refere-se a um grupo de *multicast*, o qual possui um endereço especial pré-determinado usado tanto pelo

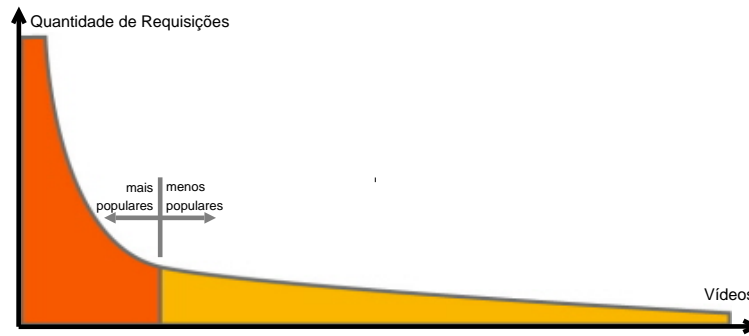


Figura 2.1: Efeito do *long tail* no acesso aos vídeos

provedor do conteúdo quanto pelo cliente.

Por outro lado, quando a aplicação não se encaixa no perfil de concentração de acesso ou na qual a quantidade agregada de requisições aos conteúdos menos populares (isto é, que recebem menor quantidade de requisições individualmente), pertencentes ao chamado *long tail* (ilustrado na Figura 2.1), é grande, o uso de *broadcast* e *multicast* não favorece a escalabilidade. Para lidar com isso, é necessário desenvolver mecanismos que permitam aumentar a vazão do sistema (da rede e, eventualmente, dos demais componentes) conforme cresce a demanda da aplicação.

2.1.2 Modos de Distribuição de Mídia Contínua

Existem duas possibilidades no envio de mídia contínua para o cliente: *download* e *streaming* [90].

No modo *download* o usuário recebe toda a mídia requisitada antes de proceder com a exibição. Esta abordagem tende a produzir uma latência inaceitável no início da exibição devido ao elevado tempo gasto na transferência, causado pela grande quantidade de dados deste tipo de mídia³.

Contrastando com essa estratégia, o modo *streaming* permite que a exibição inicie tão logo uma porção mínima do vídeo chegue até o cliente. Desta forma, os demais trechos vão sendo recebidos, decodificados e exibidos em seqüência, caracterizando-se uma aplicação de tempo real. Apesar de praticamente eliminar a latência no início de exibição, esta abordagem introduz maior complexidade na transmissão já que os trechos do vídeo devem chegar no cliente a tempo de serem exibidos, de modo a não provocar interrupções na exibição.

³Vídeo MPEG-1 com duas horas ocupa em torno de 1350 MBytes.

Área	Exemplo de Aplicação
Aprendizado	Ensino a distância, treinamento corporativo, ...
Entretenimento	Filmes/Notícias em casa, durante viagens,
Negócios	Propaganda, Catálogos multimídia, ...

Tabela 2.2: Aplicações de VoD

2.1.3 Vídeo sob Demanda

A aplicação Vídeo sob Demanda (*Video on Demand* - VoD) pode ser caracterizada como uma vídeo locadora eletrônica [85], onde o cliente escolhe o título que deseja assistir a partir de um determinado catálogo. No caso ideal, o cliente começa a assistir o conteúdo requisitado imediatamente, sendo a transmissão realizada no modo *streaming* anteriormente exposto. Além disso, dependendo do nicho de aplicação (exemplificados na Tabela 2.2, para as três áreas principais), o cliente deve ser capaz de interagir com a exibição do vídeo (podendo parar, avançar, recuar, etc). Implementar um sistema de VoD com todas essas funcionalidades, capaz de atender uma grande monta de clientes, não é tarefa trivial. Isto ocorre porque existe um compromisso entre a ocupação de largura de banda de rede do servidor e o oferecimento de capacidade de interação ao usuário.

2.1.3.1 Componentes Básicos de Sistemas VoD

Tipicamente, um sistema de VoD é formado por três componentes: servidor de vídeo, responsável por armazenar e transmitir mídia contínua; clientes, os quais solicitam e consomem conteúdos; e rede de comunicação, que serve como meio de interconexão entre os dois componentes primeiramente citados. Quanto ao servidor, cabe dizer que ele pode ser caracterizado pelo seu número de canais lógicos, relacionado ao número máximo de fluxos de vídeo que o servidor suporta simultaneamente. Note que este número depende diretamente da relação entre a vazão do servidor (rede e disco, se for o caso) e a taxa de vídeos (*bit-rate*). No que tange ao cliente, algumas considerações adicionais merecem ser expostas.

Cliente

Conceitualmente, o equipamento de acesso do cliente ao sistema pode ser qualquer dispositivo capaz de executar as tarefas básicas de receber, decodificar e exibir o vídeo. Estas tarefas bastam quando a transmissão do conteúdo for síncrona, ou seja, o trecho a ser decodificado chega sempre no instante exato. Para que isto ocorra, tanto o servidor

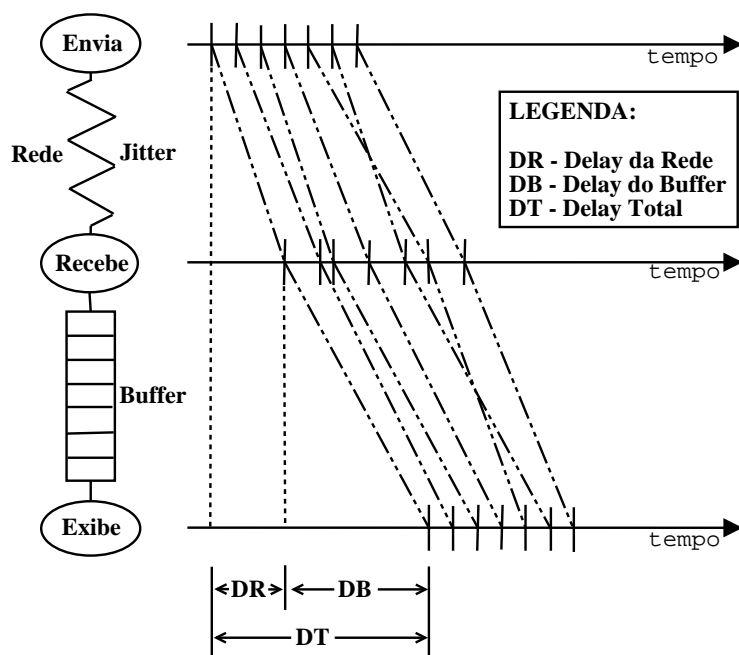


Figura 2.2: Necessidade de *buffer* no cliente

quanto a rede devem atender a requisitos significativamente estritos de qualidade de serviço (QoS), certas vezes inviáveis dependendo da tecnologia utilizada. Na prática, em um contexto onde redes de pacotes são largamente difundidas, torna-se necessário adotar um mecanismo auxiliar para garantir o correto funcionamento do sistema.

A Figura 2.2 apresenta o comportamento da transmissão em uma rede de pacotes, mostrando que ocorre um atraso (*delay*) entre o envio dos blocos e o seu recebimento, intrínseco ao tipo da rede, conhecido como *delay* (ou latência) da rede. Além disso, a rede tende a fazer com que os pacotes enviados com frequência constante sejam recebidos em intervalos heterogêneos e, em certas ocasiões, em uma ordem diferente da estabelecida no envio, impondo uma variação no atraso denominada *jitter*. Para contornar este problema, é introduzido no cliente um *buffer* local. Desta forma, caso ocorra atraso na chegada de novos trechos do vídeo, o decodificador pode consumir os blocos já presentes no *buffer* até que a transmissão se normalize, evitando congelamentos na exibição. No caso oposto, aonde trechos chegam antes do previsto, o *buffer* os acumula de modo que o decodificador possa consumi-los no momento futuro apropriado, evitando que ocorra descarte de conteúdo transmitido. Para que o *buffer* suporte essas variações, a exibição só é iniciada quando uma quantidade mínima de blocos proporcional ao *jitter* da rede é atingida, sendo o intervalo compreendido entre o recebimento do primeiro bloco e o início da exibição denominado *delay* do *buffer* (ou período de pré-busca), que somado ao atraso do rece-

bimento do primeiro bloco, definem a latência de início de exibição, aqui chamada de *delay* total (desconsiderando a latência de serviço, a qual será discutida mais a frente). É importante salientar que quanto maior o *jitter*, maior a capacidade necessária no *buffer*.

Por outro lado, a disseminação de dispositivos portáteis heterogêneos (*laptops*, PDAs, telefones celulares de última geração, *smartphones*, e etc), com acesso a redes sem fio, mas com recursos freqüentemente limitados, em particular de bateria e *display*, impõe a necessidade de introduzir no sistema mecanismos para contornar estas restrições. Outro ponto chave está relacionado ao modo como será criado o suporte a mobilidade, o que não é trivial em redes sem fio capazes de atender vários clientes simultaneamente, cobrindo uma área geográfica significativamente grande.

2.1.3.2 Categorias

Os sistemas VoD tradicionais podem ser categorizados de acordo com o grau de interatividade que oferecem aos clientes, da seguinte forma:

No VoD (NoVoD): sistema similar ao oferecido pelas emissoras de televisão, baseado em *broadcast*, onde o usuário fica refém da grade de programação estática. Todos os usuários recebem o vídeo pelo mesmo canal do servidor.

Near VoD (NVoD): sistema onde múltiplos canais são usados para transmitir o mesmo vídeo com diferenças pré-definidas de início de transmissão, possibilitando ao usuário avançar ou recuar a exibição através da troca do canal. Cada canal geralmente atende a um grupo de usuários.

True VoD (TVoD): sistema em que o usuário solicita o vídeo e é atendido prontamente (após escalonados os recursos necessários para a criação do fluxo de vídeo), sem ter que esperar por um instante de início de transmissão pré-definido. Usuários recebem fluxos por canais diferentes quando as requisições são feitas em momentos diferentes.

Interactive VoD (IVoD): extensão de TVoD onde os usuários possuem controle individual da exibição, sendo capazes de empreender operações de VCR em qualquer ponto do vídeo. Normalmente, cada usuário ocupa um canal.

Analisando as características das categorias, nota-se que conforme vão sendo oferecidas mais funcionalidades ao usuário (i.é., maior flexibilidade de uso), maior é a demanda

por recursos do sistema, sendo que NoVoD e IVoD representam os casos extremos. A NoVoD é a que necessita menos recursos do sistema, podendo assim atender a inúmeros clientes, o que atesta sua alta escalabilidade, com o ponto negativo de não proporcionar ao usuário liberdade de horário e interatividade ao assistir o vídeo. Já IVoD permite que o usuário assista o vídeo em qualquer tempo e que interaja na exibição, ao custo de levar o sistema a saturação com poucos clientes. Encontrar um nível intermediário entre estas abordagens é a questão chave para obter um sistema VoD eficiente, de forma que a oferta de interatividade e baixa latência de início de exibição não comprometam a escalabilidade do sistema. Nesta decisão, é importante considerar a real demanda dos usuários. Recentemente, a avaliação empírica [32] do comportamento dos usuários de um sistema IVoD de grande escala mostrou que, para vídeos curtos (até 30 minutos), cerca de 80% das sessões não continham interatividade, o que reforça o caráter opcional de disponibilização de operações VCR.

Além disso, independentemente da categoria, cabe ressaltar que sistemas VoD apresentam uma característica singular, conhecida como “Fator de Paciência” (*Patience Factor* - PF) dos usuários [5], que deve ser considerada no projeto do sistema. Por definição, PF é uma propriedade de sistemas VoD que expressa a expectativa dos usuários em relação ao serviço de modo que o usuário pode tolerar uma determinada latência máxima de serviço, ou seja, um tempo máximo de espera entre a requisição e o início da recepção do vídeo.

2.1.3.3 Abordagem Proativa X Reativa

Existem duas abordagens distintas que podem ser adotadas na construção de sistemas VoD quanto a transmissão dos fluxos de vídeo: proativa e reativa.

Na abordagem proativa, as transmissões ocorrem em tempos pré-determinados, sem que um usuário realmente requisiute seu início. Analisando as categorias expostas acima, nota-se que tanto NoVoD quanto NVoD adotam a abordagem proativa.

Em contrapartida, na abordagem reativa a transmissão se inicia apenas quando chegar ao sistema uma requisição proveniente de um cliente. Esta é a abordagem usada pelas categorias TVoD e IVoD anteriormente discriminadas.

2.1.3.4 Modelo Push X Pull

Além das possíveis abordagens de transmissão expostas acima, outro quesito importante em sistemas VoD é a forma como o vídeo é requisitado ao servidor, que pode ser feita

segundo o modelo *push* ou *pull*.

No modelo *push* (ou *Server-push*), o cliente sinaliza o servidor para que a transmissão inicie. Após esta solicitação inicial, o cliente fica apenas recebendo sequencialmente os trechos do vídeo, ficando sob responsabilidade do servidor temporizar o envio de forma que a exibição por parte do cliente possa proceder de forma contínua e ininterrupta. De maneira oposta, no modelo *pull* (ou *Client-pull*) o cliente solicita trechos do vídeo conforme vai necessitando, repetindo este procedimento até o final do vídeo. Segundo estudos realizados [75], o modelo *push* tende a suportar de 5% a 20% mais clientes do que o modelo *pull*.

2.1.4 Paradigma Cliente/Servidor X Peer-to-Peer

O problema da escalabilidade no acesso a um conjunto de dados está diretamente ligado à forma como este é fornecido. Os modelos tradicionais baseiam-se no paradigma Cliente/Servidor, onde existe um cliente que deseja uma determinada informação e um servidor responsável por armazená-la e transmiti-la quando requisitado. Note que nesta abordagem o número de clientes simultaneamente atendidos fica limitado pela capacidade dos recursos existentes no caminho crítico a ser percorrido pelos dados entre o local onde estão armazenados no servidor até a chegada no cliente.

Dependendo da aplicação e do cenário, os próprios clientes podem compartilhar seus dados com os demais, transformando-se em possíveis provedores de conteúdo. Nesta nova forma de troca de conteúdo estabelecida entre clientes, denominada paradigma *Peer-to-Peer* (P2P), o desempenho tende a crescer com a chegada de novos clientes, visto que agregam novos recursos ao sistema. Para descobrir em quais clientes os dados estão armazenados, torna-se necessário implementar um serviço de meta informação⁴. Isto pode ser feito de forma centralizada ou distribuída, conforme a Figura 2.3, que resume os diferentes ambientes resultantes da forma como metadados e dados são distribuídos pelos componentes do sistema.

Analisando seu conteúdo, nota-se que a Figura 2.3-a representa um sistema P2P com metadados centralizados. Já a Figura 2.3-b reflete um sistema cliente/servidor tradicional. Por fim, a Figura 2.3-c mostra um sistema P2P totalmente distribuído.

⁴Conjunto de informações sobre os dados, chamados de metadados.

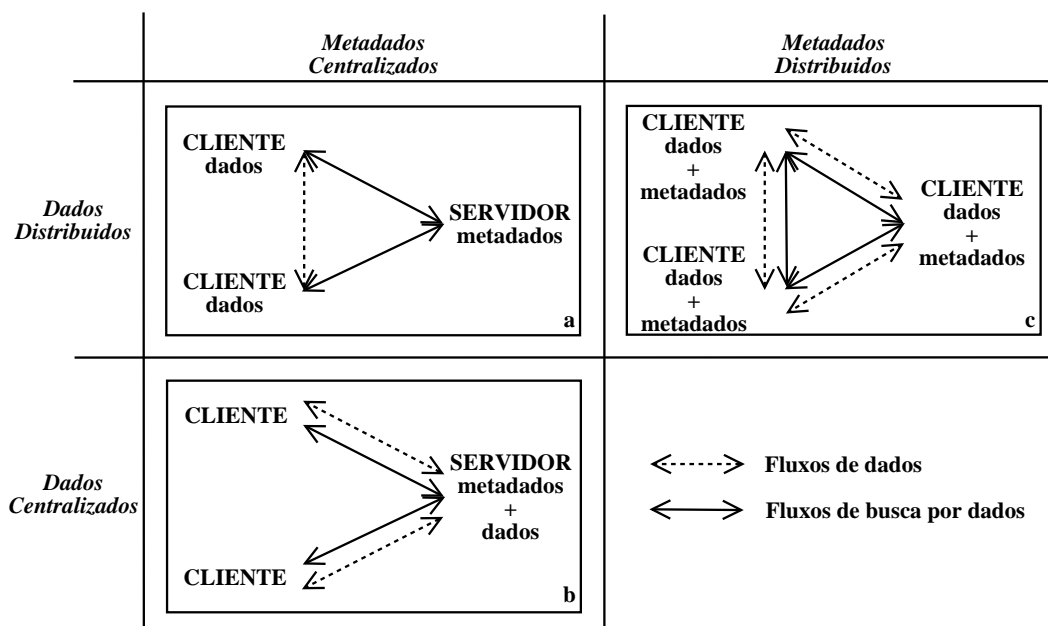


Figura 2.3: Distribuição de metadados e dados entre os componentes do sistema

2.1.5 Técnicas de Reuso de Fluxo

Em cenários onde os vídeos são frequentemente solicitados (com concentração de acesso, conforme discutido anteriormente), surge a oportunidade de adotar estratégias de compartilhamento de recursos com o intuito de aumentar a escalabilidade do sistema. Neste contexto, técnicas de reuso de fluxo, nas quais o conteúdo enviado para um determinado cliente – cuja transmissão fez uso de recursos do servidor e da rede – pode ser reaproveitado para atender outros clientes sem a necessidade de recursos extras, apresentam-se como alternativas efetivas. Nesta seção são apresentadas brevemente técnicas para *streaming* de vídeo consideradas como exemplos representativos da classe de técnicas de reuso de fluxo baseadas em *multicast* propostas na literatura [52], divididas conforme a abordagem utilizada: Proativa ou Reativa.

2.1.5.1 Técnicas Proativas

Broadcasting. Usualmente, esquemas baseados em *broadcast* [30] dividem o vídeo em segmentos que são transmitidos periodicamente para os clientes através de canais dedicados do servidor. Desta maneira, enquanto um segmento está sendo exibido, o segmento subsequente vai sendo recebido a tempo de poder ser exibido ao final do anterior, garantindo então que não ocorrerão interrupções na exibição do vídeo. Apesar de sua alta escalabilidade, as variantes de *broadcasting* gastam muitos ca-

nais por vídeo e impõem alta latência de início de exibição (tipicamente centenas de segundos; eventualmente igual a metade da duração do vídeo, na média, quando usado um canal por vídeo).

2.1.5.2 Técnicas Reativas

Batching. Nesta abordagem, as requisições feitas em um certo período para um mesmo vídeo são primeiramente enfileiradas e servidas futuramente por um único fluxo *multicast* [19]. Duas principais alternativas são usadas para controlar o atendimento das filas, baseadas nos seguintes quesitos: comprimento e tempo de espera. Na primeira, um fluxo *multicast* é enviado para os clientes esperando na fila cujo comprimento alcance um determinado valor. Na segunda, os clientes que requisitam o vídeo são inseridos na fila e esperam até um determinado tempo (em relação a chegada do primeiro cliente), de modo que um fluxo *multicast* será estabelecido quando este expirar. Note que o primeiro cliente espera mais do que o segundo, e assim sucessivamente, criando injustiça⁵ na latência de início de exibição, especialmente quando a técnica é configurada para suportar filas longas ou grande tempo máximo de espera, com o intuito de reduzir a ocupação de canais do servidor.

Patching. Nesta técnica [31], o servidor inicia um fluxo *multicast* completo do vídeo para o primeiro cliente, de modo que são transmitidos por este fluxo do primeiro ao último segmento do vídeo. Contudo, clientes subsequentes que requisitam o mesmo vídeo são adicionados ao grupo de receptores do fluxo *multicast* em curso, passando a armazenar temporariamente os segmentos transmitidos em seu *buffer* local. Concorrentemente, o servidor estabelece um fluxo adicional para cada um dos novos clientes, denominado “remendo” (*patch*), contendo os segmentos iniciais do vídeo perdidos pelos clientes. Uma vez que o *patch* é recebido, o cliente pode começar a exibir o vídeo. Finalizada a exibição do *patch*, o cliente chaveia para o seu *buffer* local para exibir os segmentos recebidos do fluxo original. Assumindo que o sistema VoD usa a taxa de transmissão igual a taxa de exibição, a duração do fluxo de remendo será definida pelo intervalo de tempo entre a requisição do primeiro cliente e a do novo cliente. Sendo assim, a desvantagem potencial de *Patching* é que necessita *buffers* locais com alta capacidade de armazenamento para suporta remendos longos.

⁵Varição significativa na latência experimentada por diferentes clientes, sendo que os clientes que requisitam o vídeo mais tarde são privilegiados com menor latência.

Chaining. A estratégia que esta técnica [79] utiliza é a de criar cadeias de *buffers* de clientes. Especificamente, enquanto um cliente mantiver armazenado no seu *buffer* local de exibição os segmentos iniciais de um vídeo, uma requisição posterior para o mesmo vídeo pode ser atendida a partir do *buffer* deste cliente anterior ao invés do servidor, assumindo que os clientes assistem o vídeo desde o seu primeiro segmento. Note que *Chaining* segue inerentemente o paradigma P2P, sendo portanto altamente escalável. No entanto, na prática a escalabilidade de *Chaining* depende da largura de banda agregada suportada pela rede de distribuição, dado que esta limita o número máximo de fluxos simultâneos.

Cooperative Video Cache (CVC). Esta técnica implementa um gerenciamento global de *caches* de vídeo através dos fluxos de vídeo que são armazenados dinamicamente nos *buffers* locais dos clientes. Além disso, emprega uma combinação de *Chaining* e *Patching* para reusar fluxos de vídeo a partir da *cache* de vídeo global. Basicamente, CVC reusa o conteúdo de vídeo distribuído através do encadeamento dos *buffers* dos clientes enquanto aplica *patches* sempre que isto oferece reuso efetivo de fluxos de *multicast* ativos [41]. Além disso, CVC pode ser usada em conjunto com a técnica *Batching* para permitir o agrupamento, em um mesmo grupo *multicast*, de clientes que requisitam um mesmo vídeo durante um determinado período de tempo. Mais detalhes sobre CVC e seu uso em conjunto com *Batching* podem ser encontrados em [71, 72].

Conforme os resultados apresentados em [62, 66], a combinação de CVC e *Batching*, em relação a várias outras combinações das técnicas supracitadas, atinge maior escalabilidade em redes com largura de banda entre clientes abundante e com pouca contenção no acesso ao meio.

2.2 Redes sem Fio

Nesta seção são abordadas inicialmente as características fundamentais que permeiam redes sem fio em geral. Em particular, são descritas as principais questões relacionadas ao padrão de fato atual para redes locais, o IEEE 802.11, salientando o problema conhecido como “controle de associação” em ambientes com múltiplos pontos de acesso.

2.2.1 Visão Geral

Redes sem fio (*wireless networks*) utilizam as frequências de rádio (RF) como meio físico, representando uma alternativa em relação a transmissão por cabos. Ou seja, a transmissão e recepção de dados se dá pelo ar, sem necessidade de obras físicas para passagem de cabos. Um dos fatores que colaboram para o sucesso deste tipo de rede é a capacidade dos dispositivos com interfaces sem fio (também chamadas de estações de usuário) de acessar a rede de qualquer lugar dentro da sua área de cobertura, ou seja, permite que o usuário, mesmo alterando sua posição geográfica, continue tendo acesso a rede, desde que dentro dos seus limites efetivos.

Enquanto parte das tecnologias suportam apenas estações portáteis, isto é, estações que podem ser movidas de um local para outro mas que só podem acessar a rede em um local fixo, outras suportam estações móveis, ou seja, permitem que estas acessem a rede em movimento. Cabe mencionar também que existem aspectos nos quais as redes sem fio são significativamente menos eficientes que redes cabeadas, sendo que três deles merecem ser salientados: maior suscetibilidade a erros, maior insegurança e menor disponibilidade de largura de banda.

Além desses aspectos, duas questões mostram-se particularmente importantes em redes sem fio: compartilhamento do meio físico e qualidade de serviço.

2.2.1.1 Compartilhamento do Meio Físico

Como em redes sem fio todas as estações se comunicam através de um mesmo meio compartilhado, podem ocorrer colisões quando múltiplas estações tentam transmitir no mesmo canal de comunicação. Logo, torna-se fundamental empregar mecanismos efetivos de controle de acesso ao canal. Estes mecanismos podem ser divididos em dois tipos [24]: a) baseados em colisão (ou contenção) e b) livres de colisão.

Os mecanismos baseados em colisão empregam mecanismos distribuídos para evitar colisão e resolver colisões quando estas ocorrem, através de retransmissão e esquemas de *backoff*⁶. Considerando tráfego estocástico, o número de colisões e retransmissões é também aleatório, fazendo com que a latência de envio de pacotes sofra variações significativas, caracterizando um serviço de melhor esforço (*best effort*). Como alternativas para melhorar o nível de serviço em redes que implementam este tipo de mecanismo, pode-se adotar sobre-provisionamento ou utilizar esquemas baseados em classes de prioridade

⁶Imposição de intervalos nos quais as estações que geraram a colisão ficam impedidas de tentar retransmitir, normalmente escolhidos aleatoriamente para evitar nova colisão.

com diferentes *backoffs* associados.

Já nos mecanismos livres de colisão o acesso ao canal é arbitrado de modo que apenas uma estação possa transmitir pacotes em um determinado período de tempo. Duas técnicas ilustram diferentes abordagens deste tipo de mecanismo: *Polling* e *TDMA*. Na primeira, estações só podem transmitir após receber um pacote chamado *polling* da unidade responsável pelo controle do canal, denominada *poller*. Na segunda, a oportunidade de acesso ao canal é dividida em quadros (*frames*), onde cada *frame* é dividido em *slots* de tempo que são alocados para as estações por uma estação especial definida como mestre do canal. Em geral, os mecanismos livres de colisão tendem a prover latências dentro de limites especificados, sendo especialmente interessantes para aplicações com requisitos estritos de QoS.

Em virtude das características apresentadas, a alocação dos canais de comunicação torna-se fundamental para otimizar a eficiência das redes sem fio. Como em redes sem fio as “fronteiras” não são muito bem definidas, a administração dos canais é significativamente mais complexa do que em redes cabeadas. Por exemplo, se duas empresas vizinhas instalarem redes sem fio em suas áreas, dependendo da forma como estas redes forem configuradas (padrão, frequência de operação, etc), poderá ocorrer interferência mútua na operação.

Planejar a operação de redes sem fio, mesmo sob um mesmo domínio (por exemplo, uma grande empresa, com uma sede afastada de outras potenciais competidoras pelos canais de comunicação), isto é, com administração centralizada, de modo que a área de cobertura seja maximizada e a interferência minimizada, não é uma tarefa trivial. Nos cenários com administração independente (como no exemplo das duas empresas apresentado acima), este problema torna-se ainda mais complexo.

2.2.1.2 Qualidade de Serviço

Embora não exista consenso sobre um conceito preciso de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) [24], pode-se assumir que o significado deste termo, de maneira genérica, se assemelha a um contrato de prestação de serviço contendo requisitos (ou parâmetros) bem definidos. Em particular, no contexto de sistemas de comunicação de dados, QoS se refere ao nível de serviço oferecido à aplicação ou usuário do sistema em termos de parâmetros quantitativos, tais como latência de transmissão, taxa de erros, vazão e etc. Segundo [24], largura de banda é o principal recurso de rede e este deve ser distribuído entre as aplicações de modo que satisfaça os requisitos de QoS estabelecidos. Para tanto,

existem duas propostas distintas que se baseiam na forma como é feito o provisionamento de largura de banda com o objetivo de oferecer QoS: (i) sobre-provisionamento de largura de banda e (ii) gerenciamento de largura de banda.

O oferecimento de QoS através de propostas baseadas em sobre-provisionamento esbarra nas limitações inerentes de rede sem fio, que trabalham com um meio compartilhado onde largura de banda é um recurso escasso, restringindo significativamente a aplicabilidade destas propostas. Sendo assim, garantir QoS em redes sem fio depende exclusivamente de políticas de gerenciamento de largura de banda. Para atingir o máximo de eficiência, essas políticas devem ser estabelecidas sobre mecanismos de QoS que sejam adequados às características da rede e da aplicação.

Basicamente, os mecanismos de QoS podem ser divididos em mecanismos de gerenciamento de tráfego e de largura de banda. Enquanto os mecanismos de gerenciamento de tráfego geralmente envolvem suporte do padrão de rede, de modo que alterações neste nível impactam em perda de compatibilidade com *hardware/software* legado, entre outras questões, os de largura de banda são implementados sob uma perspectiva sistêmica, utilizando mecanismos de reserva de recursos e de controle de admissão. Através destes mecanismos, permite-se que padrões de rede sem suporte a QoS sejam incorporados em soluções que ofereçam o nível de serviço adequado às aplicações.

2.2.2 Redes IEEE 802.11

O padrão 802.11 [33] faz parte da família de padrões 802 (Figura 2.4) definida pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) para o contexto de redes locais e metropolitanas. Especificamente, o 802.11 versa sobre redes locais sem fio (*Wireless Local Area Networks* - WLANs), sendo considerado o atual padrão de fato para este tipo de rede.

Normalmente, as redes 802.11 operam no modo infra-estruturado, onde pontos de acesso (*Access Points* - APs) funcionam como concentradores (*hubs*), manipulando todo o tráfego do canal sem fio (tanto interno, entre dispositivos móveis operando no mesmo canal, quanto externo, funcionando como uma ponte (*bridge*) para a rede cabeada onde o AP está conectado). Além do modo infra-estruturado, também é permitida a operação no modo *ad hoc*, onde a rede é composta apenas por estações com alcance mútuo de transmissão que se comunicam diretamente, sendo esta rede tipicamente criada de maneira espontânea.

Em particular, a especificação do padrão 802.11 define as camadas física (*Physical*

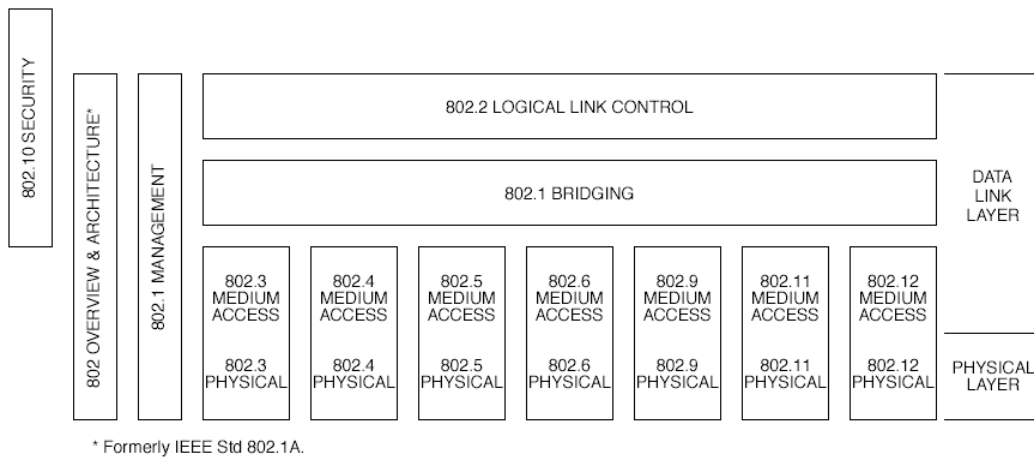


Figura 2.4: Família de padrões 802 da IEEE [33]

Data rate (Mbits/s)	Modulation	Coding rate (R)	Coded bits per subcarrier (N _{BPSK})	Coded bits per OFDM symbol (N _{CBPS})	Data bits per OFDM symbol (N _{DBPS})
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Figura 2.5: Modos de transmissão do 802.11a [34]

layer - PHY) e de acesso ao meio (*Medium Access Control layer - MAC*)⁷.

Camada PHY. Na camada física, os três principais suplementos do padrão original são o 802.11b [35], o 802.11a [34] e o 802.11g [37], ordenados cronologicamente. Segundo [54], cada um destes três padrões define vários modos de transmissão - os quais definem a taxa de dados, o esquema de modulação, e o esquema de controle de erros (ex.: FEC), se for o caso. Como exemplo, a Figura 2.5 ilustra os oito modos disponíveis no 802.11a.

Camada MAC. Na camada de controle de acesso ao meio, os principais mecanismos são: um protocolo de acesso baseado em colisão (ou contenção), denominado *Distributed Coordination Function* (DCF), implementado obrigatoriamente, e um pro-

⁷Parte da camada de enlace (*Data link layer*).

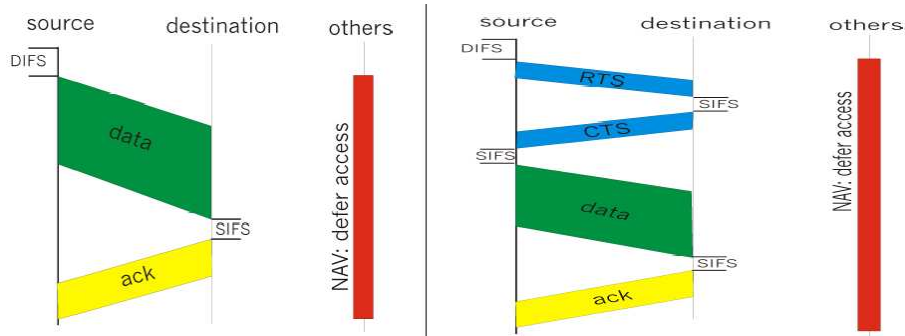


Figura 2.6: Variações do DCF sem e com RTS/CTS [49]

protocolo opcional, baseado em *polling*, conhecido como *Point Coordination Function* (PCF). O DCF utiliza um protocolo baseado em detecção de portadora e acesso múltiplo (*Carrier Sense Multiple Access - CSMA*) semelhante ao utilizado em redes cabeadas 802.3 (*Ethernet*). Além disso, adota estratégias análogas de *backoff* exponencial para tratar a ocorrência de colisões. No entanto, enquanto o uso de cabo como meio de transmissão permitiu que um protocolo CSMA com mecanismo de detecção de colisão (*Collision Detection*, chamado CSMA/CD) simples, baseado apenas em detecção de portadora, fosse empregado com sucesso no 802.3, o mesmo não se mostrou eficiente para redes sem fio. Por isso, tornou-se necessário criar uma variação do CSMA contendo um novo mecanismo capaz de evitar colisões (*Collision Avoidance*, denominado CSMA/CA), introduzindo o conceito de detecção de colisão virtual através de um vetor de alocação de rede (*Network Allocation Vector - NAV*) capaz de prever o intervalo em que o meio estará ocupado, utilizado em conjunto com o seu mecanismo de detecção de portadora, conhecido como CCA (*Clear Channel Assessment*). Como utiliza *backoff* exponencial, o DCF fornece um nível de QoS baseado em melhor esforço, sem garantias de serviço em termos de largura de banda e de latência. Isto é verdade porque o DCF tenta evitar colisões mas não garante que elas não ocorrerão. Complementando a descrição do DCF, resta dizer que este mecanismo suporta dois modos de operação, referentes a habilitação ou não do protocolo RTS/CTS, ilustrados na Figura 2.6.

Normalmente o RTS/CTS é habilitado pois evita o problema conhecido como “terminal escondido” (*hidden terminal problem*). Este problema surge, por exemplo, quando duas estações, X e Y, precisam transmitir dados para estação Z. Caso X e Y não tenham alcance mútuo de transmissão entre si, é possível que tentem transmitir

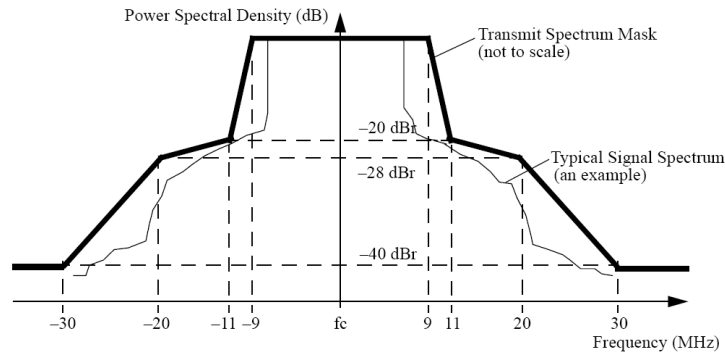


Figura 2.7: Máscara de espectro definida no suplemento do 802.11a [34]

estes dados ao mesmo tempo, fazendo com que ocorra colisão durante o recebimento na estação Z. Usando o esquema RTS/CTS, toda transmissão de dados é precedida por um *frame* de pedido de envio (*Request To Send* - RTS). Se o destinatário está livre para receber os dados, responde com um *frame* de liberação de envio (*Clear To Send* - CTS). Assim, o dado só é realmente transmitido após o recebimento do CTS. Voltando ao exemplo, agora sob a perspectiva de RTS/CTS, inicialmente X envia um RTS a Z, que responde com o CTS. Ao enviar o CTS, Z implicitamente avisa a todas as demais estações presentes no seu escopo de transmissão, dentre elas Y, que o canal estará ocupado, evitando colisões potenciais.

Por outro lado, o PCF, baseado em *polling*, proporciona um desempenho de serviço previsível porque os dispositivos móveis só podem transmitir quando recebem uma mensagem do coordenador de ponto (*Point Coordinator*), cuja funcionalidade pode estar incorporada no AP. Embora o PCF evite potencialmente a ocorrência de colisões, é raramente implementado nos dispositivos disponibilizados nos últimos anos [60]. Além disso, em decorrência de problemas detectados no PCF, a IEEE desenvolveu modificações na camada MAC (baseadas em classes de prioridade com diferentes *backoffs* associados) com o intuito de melhorar o suporte a QoS, traduzidas no recente padrão 802.11e [38].

Um detalhe importante sobre a camada física, importante para o contexto desta tese, é a máscara de espectro adotada para transmissão (*transmit spectrum mask*), definida no suplemento do 802.11a [34] (Figura 2.7) e referenciada no suplemento do 802.11g [37].

Segundo a definição, o espectro de transmissão deverá ter 0 dB (dB relativo a densidade espectral máxima do sinal) em uma faixa de frequência não superior a 18 MHz, -20 dB a uma distância de 11 MHz, -28 dB a 20 MHz e -40 dB a partir de 30 MHz.

Dependendo da potência de transmissão usada nos APs e nos clientes, a atenuação de sinal exigida nas frequências adjacentes pode não ser suficiente, ou seja, pode interferir no mecanismo CCA de dispositivos operando no canal adjacente. Este efeito é conhecido na literatura como interferência de canal adjacente (*Adjacent Channel Interference - ACI*).

2.2.2.1 Arquiteturas WLAN

Conforme [91], as arquiteturas WLAN podem ser classificadas em três tipos:

Autonomous WLAN Architecture: arquitetura autônoma tradicional em que cada WTP (*Wireless Termination Point*) é um único dispositivo físico que implementa todos os serviços 802.11, sem a necessidade explícita de controle/serviço externo realizada por outro dispositivo. Por isso, são conhecidos como “*Fat APs*” ou “*Standalone APs*”.

Centralized WLAN Architecture: arquitetura hierárquica que utiliza um ou mais dispositivos físicos especializados para controlar de forma centralizada um grande número de WTPs, denominados “*Access Controllers*”. Estes controladores muitas vezes são implementados em *bridges*, *switches* ou *roteadores*, funcionando como ponto de agregação de tráfego. Como nesta arquitetura os WTPs não podem implementar todos os serviços 802.11, pois parte deles deve ser executada pelo controlador, são denominados “*Light Weight APs*” ou “*Thin APs*”.

Distributed WLAN Architecture: arquitetura distribuída em que os dispositivos sem fio participantes são capazes de formar uma rede entre eles. As redes *mesh* [4] são exemplos onde dispositivos se agrupam em malhas (*meshes*) que se comunicam entre si através de *links* sem fio 802.11 e onde parte dos dispositivos possuem também conexões *Ethernet*, agindo como *gateways* para a rede externa.

2.2.2.2 Pontos de Acesso Co-localizados

Na especificação do padrão 802.11, o termo canal é definido como sendo uma instância de uso do meio empregada com o propósito de passagem de unidades de dados de protocolo (*Protocol Data Units - PDUs*) que pode ser usada simultaneamente, no mesmo volume de espaço, com outras instâncias de uso do meio (em outros canais) por outras instâncias da mesma camada física (PHY), aceitando uma baixa taxa de erros decorrente de interferência mútua. Além disso, é salientado que, dependendo da PHY adotada, podem ser oferecidos apenas um ou múltiplos canais.

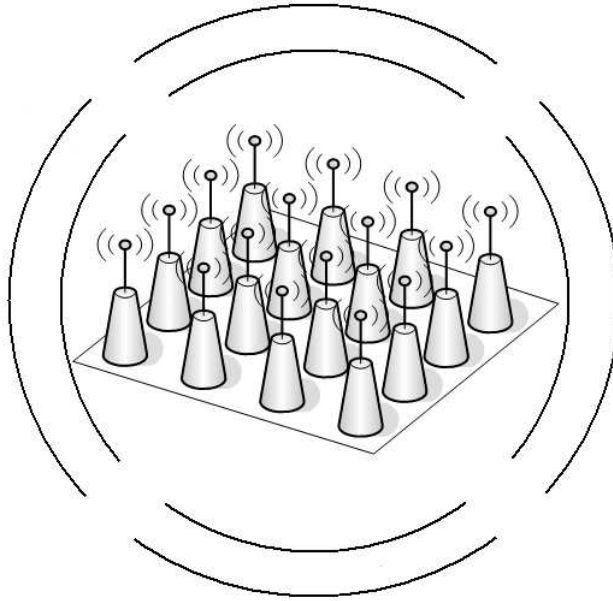


Figura 2.8: Pontos de acesso co-localizados

Em particular, enquanto o 802.11g oferece apenas três canais capazes de coexistir sem interferência significativa, operando na faixa de 2,4 GHz, o 802.11a suporta até treze canais independentes (dependendo das regulamentações vigentes no país), utilizando a faixa de 5 GHz. Como consequência, é teoricamente possível agregar as capacidades destes canais, de modo que pode-se ter até dezesseis canais paralelos com uma mesma área de cobertura, utilizando para isso APs co-localizados (*collocated APs*) – APs posicionados significativamente próximos uns dos outros, com a mesma área de cobertura, usando diferentes canais sem sobreposição de frequência entre si –, conforme ilustrado na Figura 2.8. Segundo [56], embora cada canal de 802.11a e 802.11g tenha 54 Mbps de taxa máxima de *link*, a vazão máxima efetiva usando UDP é próxima a 30,7 Mbps, o que acarreta em uma vazão agregada total de 491,2 Mbps.

2.2.2.3 Controle de Associação

Embora a largura de banda agregada oferecida por pontos de acesso co-localizados seja significativa, as variantes do padrão 802.11 não dispõem de um mecanismo eficiente que otimize o uso dos pontos de acesso. Especificamente, o 802.11 requer um procedimento adequado para a escolha do AP onde o dispositivo do cliente deve ser associado quando este adentra a área de cobertura de múltiplos APs, sejam estes co-localizados ou não,

operando em canais não sobrepostos. Na literatura, este procedimento é denominado “controle de associação” (*Association Control - AC*).

Conforme [46], o processo de associação de estações aos pontos de acesso no padrão 802.11 é feito em três fases: Escaneamento, Decisão e Associação.

Fase de Escaneamento (*scanning*). Inicialmente, quando uma estação é ligada, ela escuta todos os canais durante um período específico de tempo. Durante este processo, coleta *frames* de *beacons*⁸ enviados pelos pontos de acesso disponíveis no início do período reservado ao PCF.

Fase de Decisão (*decision*). Depois de coletados os *frames*, a estação toma uma decisão em relação ao AP com o qual deseja iniciar o procedimento de associação.

Fase de Associação (*association*). A estação troca pacotes de controle com o AP selecionado com o objetivo de se tornar um membro da sua célula, o que será permitido caso a estação seja autenticada com sucesso. A associação propriamente dita ocorre durante o período reservado ao DCF.

A heurística básica adotada no 802.11 para a fase de decisão é conhecida como *Strongest Signal First* (SSF), caracterizada por priorizar a escolha de APs de acordo com o indicador de intensidade do sinal (*Receive Signal Strength Indicator - RSSI*). Porém, é notório que a SSF frequentemente atinge fraco balanceamento de carga (uso dos canais) entre os APs, além de não prover garantias de largura de banda mínima. Em particular, quando aplicado em APs co-localizados, a SSF tende a apresentar um comportamento aleatório pois todos APs estarão na mesma distância em relação aos clientes. Além da SSF, outra heurística parcialmente adotada em soluções proprietárias e não interoperáveis é a denominada *Least Loaded First* (LLF). Na LLF, um cliente que entra na rede é atribuído ao AP com maior largura de banda disponível. Embora a LLF permita otimizar o uso dos APs [14], a falta de interoperabilidade entre diferentes marcas de equipamentos sem fio restringe o apelo de LLF. Além disso, alguns fabricantes estenderam a LLF para suportar aplicações que requeiram garantia de largura de banda mínima, exacerbando ainda mais o problema da interoperabilidade.

⁸*Frames* enviados pelo AP para sincronizar a rede.

2.3 Considerações Finais

Como visto no decorrer deste capítulo, a eficiência da transmissão de mídia contínua depende da compressão do conteúdo. Neste quesito, os padrões mais amplamente adotados são os definidos pelo MPEG, com destaque especial para o MPEG-4 que, devido às características apresentadas, tem sido considerado o principal candidato para incorporar novos produtos baseados em transmissão de vídeo. Devido a isso, optou-se por adotar este padrão no desenvolvimento desta tese. Além disso, foi salientada a necessidade de fazer com que diversos clientes compartilhem um mesmo fluxo através de *multicast* em cenários onde ocorre concentração de acesso em parte do acervo e da ineficiência destas técnicas em cenários onde as requisições se espalham significativamente pelo acervo, tendo sido mostrados os protocolos básicos e infra-estrutura exigida para sua utilização. Visto que o cliente deseja assistir o conteúdo imediatamente após a requisição, o modo *streaming* de distribuição mostra-se mais interessante para o usuário em relação ao modo *download*.

Vídeo sob Demanda, a subcategoria mais proeminente de distribuição de mídias contínuas, adotada como objeto de pesquisa desta tese, aproveita o modo *streaming* para atender as requisições de vídeo em qualquer instante e com baixa latência de início de exibição, sendo aplicável a diversas áreas de aprendizagem, entretenimento e negócios. Foram abordadas quatro categorias de sistemas VoD (NoVoD, NVoD, TVoD e IVoD), as quais possuem aspectos positivos e negativos, indicando a necessidade de encontrar um nível intermediário entre elas para conseguir uma implementação eficiente. Como alternativas de projeto, foram mostradas as abordagens proativa e reativa, onde a segunda tende a apresentar menor latência, e os modelos *push* e *pull*, onde o primeiro tende a atender uma maior quantidade de clientes simultâneos. Isto posto, esta tese restringe o estudo a sistemas TVoD e a uma categoria intermediária entre TVoD e NVoD, com atenção especial para o “Fator de Paciência”, usando a abordagem reativa dentro do modelo *push*.

Foi exposta também a necessidade de existir um *buffer* no cliente para eliminar o *jitter* da transmissão e a superior capacidade de atingir escalabilidade do modelo *peer-to-peer* em relação ao cliente/servidor tradicional, desde que exista capacidade suficiente na rede de transmissão. Após, foram apresentadas diversas técnicas de reuso de fluxo, que podem ser combinadas para aumentar a escalabilidade de sistemas VoD, de acordo com as características do modelo do sistema, tanto para ambientes com largura de banda entre clientes abundante quanto para ambientes com tecnologias de rede que limitam significativamente

a comunicação direta entre clientes. Entretanto, estas técnicas são especialmente efetivas em aplicações com concentração de acesso em poucos conteúdos. Por isso, esta tese foca em estratégias para construção de sistemas escaláveis sem assumir o uso de técnicas de reuso, isto é, que sejam efetivas para qualquer padrão de acesso ao conteúdo (note que, como consequência, esta abordagem tende a potencializar técnicas de reuso que sejam eventualmente agregadas a estes sistemas).

Por outro lado, foi mostrado que redes sem fio, apesar de serem um exemplo de tecnologia onde a comunicação entre clientes é limitada, apresentam vantagens significativas em relação a redes cabeadas, em especial o suporte a dispositivos (estações) portáteis e móveis. No entanto, para poder aproveitar estas vantagens foi visto que é necessário controlar de forma eficiente o acesso ao meio e utilizar artifícios que garantam QoS. Em seguida, foram descritos os principais aspectos relacionados ao padrão 802.11, considerado o padrão de fato em WLANs. Em particular, foi salientado que, teoricamente, esta tecnologia é capaz de oferecer significativa largura de banda agregada, através de pontos de acesso co-localizados, desde que sejam utilizadas estratégias eficientes para o controle de associação das estações aos pontos de acesso.

Dado este cenário, esta tese concentra-se na proposta de sistemas com controle de acesso ao meio através de mecanismos básicos de colisão/contenção com *backoff* exponencial, por dois motivos. Em primeiro lugar, porque o DCF, pertencente a esta categoria, é o protocolo usado de fato em redes WLAN baseadas no padrão IEEE 802.11 [33], tecnologia utilizada como referência nesta tese. Em segundo, porque considera-se que é possível estabelecer um projeto de sistema focado na aplicação que tenha controle sobre o padrão de tráfego gerado e, com isso, evitar que ocorram colisões. Além disso, adota-se nesta tese a estratégia de provisionamento de largura de banda através de políticas de gerenciamento baseadas em mecanismos de reserva de recursos e de controle de admissão focados nas singularidades da aplicação, atacados sob uma perspectiva sistêmica.

No que se refere ao padrão 802.11 e seus suplementos, o estudo se restringe às variantes de maior vazão, “a” [34] e “g” [37], operando com pontos de acesso co-localizados. Em particular, o foco principal deste trabalho está no desenvolvimento de sistemas VoD que utilizem eficientemente os recursos da rede, através do desenvolvimento de heurísticas otimizadas de controle de associação capazes de explorar as singularidades da aplicação e da rede. Apesar de existirem soluções com grande potencial para o problema da alocação de canal em redes independentes – dentre elas mecanismos para a realização da seleção automática do canal de operação [82] – esta tese pressupõe a

administração centralizada de uma arquitetura WLAN autônoma, sem a existência de um *hardware* específico de controle de APs ou de formação de redes *mesh* [4].

Nos capítulos seguintes são empregados os conceitos definidos neste capítulo para apresentação e avaliação do sistema básico para VoD escalável em redes sem fio (*Scalable Wireless VoD* - SWVoD) baseado em APs co-localizados, introduzido nesta tese, bem como para as propostas e análises de suas derivações.

Capítulo 3

Sistema VoD Escalável com Pontos de Acesso Co-localizados

Conforme exposto no Capítulo 1, a motivação inicial desta tese surgiu da inexistência de um trabalho significativo que avaliasse o desempenho escalável de sistemas VoD que explorassem a largura de banda agregada disponibilizada por APs co-localizados. Além disso, também não foram encontrados trabalhos que tivessem proposto e avaliado extensões à heurística de controle de associação genérica *Least Loaded First* (LLF), os quais tivessem como objetivo prover garantias de largura de banda mínima para viabilizar VoD sobre WLANs baseadas no padrão 802.11. Note que a heurística LLF convencional tem como objetivo apenas o balanceamento de carga, isto é, não visa garantir reserva de recursos aos usuários associados à um determinado AP.

Este capítulo visa apresentar e avaliar a eficiência da proposta básica de um sistema VoD escalável para redes sem fio (*Scalable Wireless VoD* - SWVoD) baseado em pontos de acesso (*Access Points* - APs) co-localizados, empregando a heurística genérica LLF+, uma versão de LLF modificada para garantir largura de banda mínima. Inicialmente, é apresentado o modelo do sistema SWVoD, com suas principais variáveis e premissas. A seguir, é mostrado o projeto do sistema SWVoD proposto, contemplando os componentes da arquitetura de *hardware* e *software*, o protocolo de sinalização adotado, e a operação interna do componente responsável pelo controle de associação. Após isso, é exposta a avaliação experimental do sistema proposto, realizada através da ferramenta de simulação TCHE¹, seguida das considerações finais.

¹Apresentação detalhada de TCHE no Apêndice A.

3.1 Modelo do Sistema SWVoD com APs Co-localizados

A modelagem do sistema SWVoD com APs co-localizados envolve a definição do problema do controle de associação e das principais variáveis que afetam o desempenho, amparadas por um conjunto de premissas assumidas.

3.1.1 Controle de Associação Genérico em SWVoD

Nesta subseção, modela-se o problema do controle de associação para sistemas que distribuem vídeos sob demanda através de WLANs, com pontos de acesso co-localizados, para estações móveis (*stations* - STA) que possuem interfaces de rede 802.11 multi-banda (*multi-band*), permitindo que estas sejam configuradas no padrão “a” ou “g” por *software*, sem a adoção de técnicas de reuso de fluxo².

Define-se $Max_{channels}$ como sendo o número máximo de canais sem sobreposição, ou seja, capazes de coexistir sem interferência significativa. A partir desta definição, pode-se dizer que a rede é formada por um conjunto de pontos de acesso (APs) co-localizados (AP_{total}), onde $1 \leq AP_{total} \leq Max_{channels}$. Além disso, denota-se por $MinAP_{throughput}$ e $MaxAP_{throughput}$ a mínima e a máxima vazão (*throughput*) efetiva possível dos APs, respectivamente. Sendo assim, tem-se que a vazão efetiva do i ésimo (iésimo) AP, referenciada por ($AP_{throughput_i}$), é limitada por estes extremos, de modo que $MinAP_{throughput} \leq AP_{throughput_i} \leq MaxAP_{throughput}$. Com base nestas definições, pode-se derivar a largura de banda agregada (*Aggregate Bandwidth*) da porção sem fio do sistema, doravante expressa por AB , e definida pela seguinte fórmula:

$$AB = \sum_{i=1}^{AP_{total}} AP_{throughput_i} \quad (3.1)$$

Considera-se um conjunto de vídeos (V_{total}), onde $MinV_{rate}$ e $MaxV_{rate}$ são as taxas de vídeo (*video rate*) mínima e máxima, respectivamente, de acordo com as taxas médias (em Kbps) de consumo dos vídeos deste conjunto medidas no decodificador. Além disso, define-se $MinV_{length}$ e $MaxV_{length}$ como sendo a duração (*length*) mínima e máxima dos vídeos. Conseqüentemente, pode-se dizer que o i ésimo vídeo tem uma taxa (V_{rate_i}) e uma duração (V_{length_i}), onde $MinV_{rate} \leq V_{rate_i} \leq MaxV_{rate}$ e $MinV_{length} \leq V_{length_i} \leq MaxV_{length}$. Logo, é possível concluir que o número mínimo de fluxos (*streams*) de vídeo

²A incorporação de técnicas de reuso de fluxo no modelo traduz-se como uma das mais relevantes questões de pesquisa para trabalhos futuros, conforme a discussão apresentada no Capítulo 9.

suportados simultaneamente pela porção sem fio do sistema é de $\frac{AB}{MaxVrate}$, enquanto que o máximo é de $\frac{AB}{MinVrate}$.

Assume-se que a taxa de requisições (*request rate*) de vídeo feitas pelos clientes, também chamada de taxa de chegada (*arrival rate*), segue um processo de Poisson [25] com um determinado λ , de modo que em média são feitas λ requisições de vídeo por minuto. Além disso, a popularidade dos vídeos segue uma distribuição de Zipf [19] generalizada com desvio (*skew*) α . Sendo assim, em um determinado período de tempo de simulação (*time of simulation*), expresso em segundos, referido daqui em diante como TS , a quantidade total de requisições de vídeo (R_{total}) é em média $\frac{TS*\lambda}{60}$.

Seja C_{video_i} o identificador (id) do vídeo requisitado pelo i ésimo cliente e $T_{request_i}$ o tempo no qual a requisição foi feita. Considere C_{ap_i} como sendo o AP ao qual o i ésimo cliente é associado e $T_{service_i}$ o tempo no qual o sistema efetivamente aloca recursos necessários para atender esta requisição, dentre eles largura de banda do C_{ap_i} , permitindo que um fluxo de vídeo comece a ser enviado para o i ésimo cliente. A partir destas definições, pode-se derivar a latência de serviço (*Service Latency*) do i ésimo cliente (SL_i), expressa em segundos, sendo esta igual a $T_{service_i} - T_{request_i}$. Como descrito anteriormente, sistemas VoD utilizam um *buffer* de exibição (*playout buffer*) no cliente, o qual deve ser preenchido antes que a exibição seja iniciada. Sendo assim, o tempo gasto neste preenchimento ($Prefetch_i$) é definido como sendo o período de pré-busca (*prefetch*) do i ésimo cliente, expresso em segundos. Logo, o tempo total de espera entre a requisição e o início da exibição experimentado pelo i ésimo cliente (PL_i), chamado de latência de exibição (*playback latency*), é igual a $SL_i + Prefetch_i$ ³.

Por fim, $R_{accepted}$ e R_{denied} denotam os totais de requisições que são aceitas e negadas/bloqueadas, respectivamente, de modo que o principal objetivo é minimizar R_{denied} para aumentar a escalabilidade do sistema. Entretanto, uma nova requisição proveniente do i ésimo cliente só pode ser aceita se for possível alocar em um dos APs a largura de banda necessária ($V_{rate_{C_{video_i}}}$). Caso contrário, a requisição é negada. Intuitivamente, a disponibilidade de largura de banda nos APs é função de λ , V_{length} , V_{rate} e AB . Sendo assim, $R_{accepted}$ e R_{denied} irão variar de acordo com a combinação destes parâmetros.

3.1.2 Premissas

O modelo apresentado foi proposto assumindo as seguintes premissas:

³Desprezando-se a latência de rede.

Rede Dedicada e sem Colisões: a rede é dedicada apenas para tráfego gerado pelo sistema de VoD. Além disso, como existe uma fonte centralizada principal de tráfego – o servidor de vídeo – pode-se assumir que na prática as colisões nos APs será insignificante devido ao pequeno tamanho e quantidade dos pacotes de controle enviados pelos componentes do sistema. Em função disto, o sistema, mesmo usando o mecanismo DCF padrão do 802.11 sem modificações, é capaz de garantir a QoS necessária para a aplicação;

Área de Cobertura dos APs e Modos de Transmissão: a área de cobertura dos APs abrange toda a área de simulação e todos os dispositivos (estações) de clientes usam o mesmo modo de transmissão. Os APs seguem uma arquitetura de WLAN autônoma (*Autonomous WLAN Architecture*) [91] na qual podem estar configurados tanto com o mesmo identificador, formando uma ESS (*Extended Service Set*), ou como um conjunto de BSSs (*Basic Service Sets*) com identificadores próprios. Ou seja, não requer um *hardware*⁴ controlador de acesso (*Access Controller*) centralizado para gerenciar, controlar e configurar os APs, como ocorre na arquitetura de WLAN centralizada (*Centralized WLAN Architecture*);

Interferência entre Canais: são considerados apenas canais sem sobreposição, usando diferentes faixas de frequência, assumindo que não ocorre interferência co-canal. Conforme mostrado em [74], a interferência causada por múltiplos rádios operando próximos uns dos outros em canais não sobrepostos é desprezível se cada AP estiver ao menos 60 cm distante de qualquer outro AP. Por simplicidade, o modelo assume que não existe outro tipo de fonte de sinal que possa causar interferência (premissa abordada com mais detalhes no Capítulo 8);

Erros de Transmissão: a resiliência a erros não é incorporada no modelo embora seja uma importante questão em distribuição de vídeo sem fio [23]. Entretanto, note que o VoD permite tratamento de erros em várias camadas. Resumidamente, esquemas que operam abaixo da camada de aplicação se beneficiam da capacidade dos codificadores de vídeo atuais de reduzir a taxa dos vídeos sem degradação linear da imagem, liberando espaço para inserção de técnicas de FEC (*Forward Error Correction*) na camada de enlace ou de rede. Já os esquemas que atuam na camada de aplicação podem ser implementados no decodificador ou no codificador. Es-

⁴A 3Com, por exemplo, comercializa equipamentos denominados *WLAN Controllers* com esta finalidade, em alguns casos integrados a comutadores, chamados de *WLAN Switches* [3].

quemados baseados no decodificador, chamados de técnicas de cancelamento de erros (*error concealment techniques*), são baseados na capacidade dos decodificadores de reconstruir quadros de vídeo perdidos usando quadros anteriores e posteriores. Esquemas baseados no codificador visam aumentar a robustez do vídeo comprimido para superar erros de transmissão⁵. Além disso, cabe destacar que as interfaces 802.11 já adotam um esquema de retransmissão na camada MAC, o qual entra em ação quando o transmissor envia um pacote de dados e não recebe, como resposta imediata, o pacote ACK do receptor;

Potência de Sinal Equalizada: todos os APs ficam instalados próximos o suficiente uns dos outros e localizados no centro do cenário de simulação, usando a mesma potência de transmissão. Logo, a intensidade de sinal percebida pelos clientes é a mesma para todos os APs. Como não existe um AP com sinal mais forte, a heurística de controle de associação SSF tende a se comportar como uma heurística de escolha aleatória, ou seja, não é eficiente nesse contexto.

3.2 Proposta do Sistema Básico

Nesta seção, é apresentada a nova proposta para sistemas VoD escaláveis operando em WLANs baseadas no padrão IEEE 802.11. Inicialmente, são introduzidos os componentes de *hardware* e *software* do sistema. Após, é descrito detalhadamente o procedimento de controle de associação, a unidade responsável pelo controle de associação, chamada de “Gerente de Canais sem Fio” (*Wireless Channel Manager - WCM*), utilizando a heurística genérica LLF+.

3.2.1 Visão Geral do Sistema

A Figura 3.1 mostra o diagrama, no que se refere ao *hardware*, adotado no sistema. Ele consiste de um *cluster* de APs 802.11 *commodities*⁶, posicionados de uma maneira co-localizada onde os APs são instalados próximos uns dos outros, praticamente na mesma posição, permitindo que estes APs atendam a mesma área de cobertura através de canais não interferentes. Além disso, os APs são interconectados não apenas entre si mas também ao servidor do sistema através de um comutador (*switch*) com uma matriz de

⁵Em [77] pode ser encontrada uma descrição aprofundada de mecanismos de controle de erro.

⁶Equipamentos padronizados, com variedade de fornecedores e fabricantes, por isso de baixo custo.

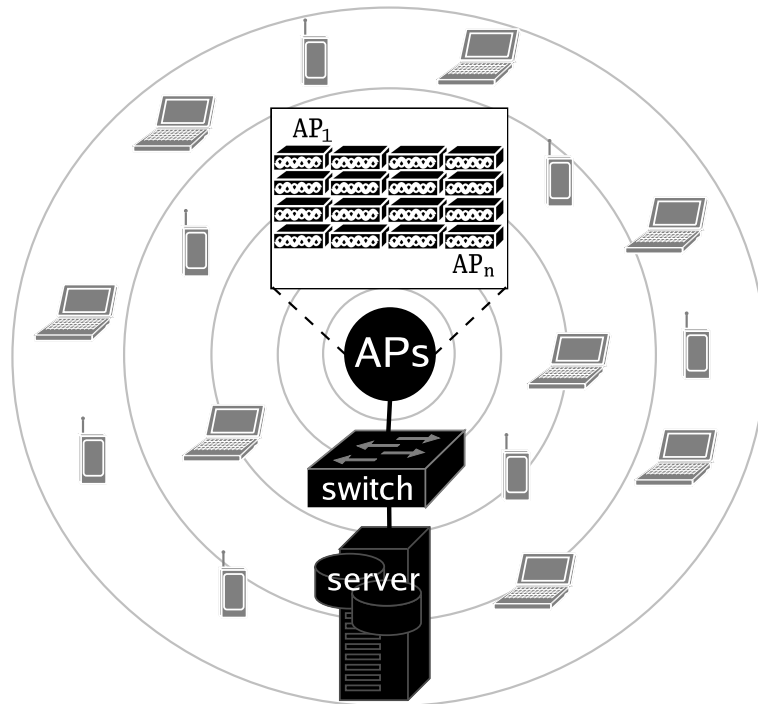


Figura 3.1: Componentes de *hardware* utilizados no sistema SWVoD proposto

comutação com vazão superior a vazão agregada dos APs. Em particular, a porta do comutador a qual é conectada o servidor não deve representar um “gargalo” para os pacotes transmitidos por ele. Por exemplo, tendo em vista a limitação de vazão por canal das variantes do padrão 802.11 exploradas nesta tese (“a” e “g”), e o número máximo de canais não sobrepostos proporcionado por elas, um *switch Ethernet* com dezessete portas, sendo dezesseis *Fast* e uma *Gigabit* (na qual é ligado o servidor), mostra-se suficiente em virtude da vazão máxima de cada AP (já que $MaxAP_{throughput}$ é inferior a 31 Mbps, significativamente menor que a vazão proporcionada por uma porta *Fast Ethernet*) e da agregada (como $Max_{channels}$ é 16, no pior caso *AB* se aproxima de 500 Mbps, proporcional a capacidade efetiva de uma interface *Gigabit Ethernet*).

A operação do sistema VoD proposto envolve três componentes de *software* (Figura 3.2), responsáveis pelas seguintes tarefas específicas:

Video Server (VS): é executado no servidor do sistema (*system server*), atendendo as solicitações de criação de fluxos de vídeo⁷ como um servidor de vídeo central (isto é, como o principal ponto de armazenagem de vídeos) ou como um servidor *proxy*, localizado entre o cliente e o servidor de vídeo, formando uma arquitetura de VoD

⁷Nesta tese assume-se que o servidor possui capacidade suficiente para atender imediatamente todas as requisições recebidas.

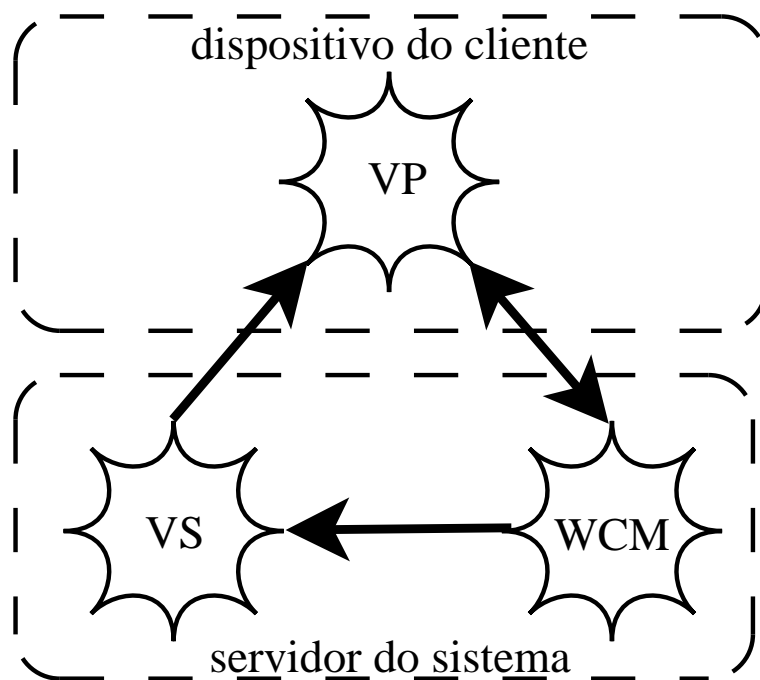


Figura 3.2: Componentes de *software* empregados no sistema SWVoD proposto

em três níveis (*three-tier VoD architecture*) conforme ilustrado no Capítulo 1;

Wireless Channel Manager (WCM): é executado no servidor do sistema, sendo responsável por gerenciar o controle de associação, selecionando e sinalizando aos clientes que efetuam requisições de vídeo os APs apropriados, de acordo com a disponibilidade de recursos, aos quais esses clientes devem se reassociar para receber o fluxo de vídeo;

Video Player (VP): é executado no dispositivo do cliente (*client device*) com suporte a interface IEEE 802.11a/g multi-padrão (por exemplo: *laptops*, PDAs, *smartphones*, telefones celulares de última geração, entre outros), onde realiza dois tipos de tarefas: operações relacionadas a vídeo, tais como requisitar, receber e decodificar o fluxo de vídeo, e relativas a operação de reassociação, isto é, alterar o AP ao qual o cliente está atualmente associado (escolhido inicialmente pelo cliente de acordo com a heurística padrão do *driver/firmware* da interface 802.11 usada no seu dispositivo; normalmente SSF, onde é escolhido o AP com melhor relação sinal/ruído) conforme a sinalização do WCM;

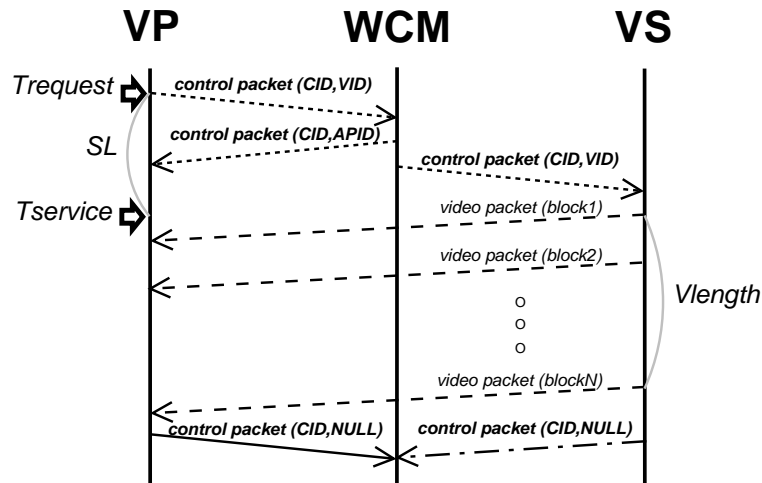


Figura 3.3: Protocolo básico usado na sinalização

3.2.2 Procedimento de Controle de Associação

Conforme ilustrado na Figura 3.3, toda vez que um cliente requisita um vídeo, o seu VP envia um pacote de controle $token1 (CID, VID)$ para o WCM através de qualquer um dos APs, onde CID e VID são, respectivamente, o id do cliente e o id do vídeo. Dependendo da largura de banda disponível nos APs co-localizados, o WCM aceita ou rejeita a requisição.

Sempre que aceita a requisição, o WCM envia um pacote de controle $token2$ para o cliente CID , na forma $(CID, APID)$, onde $APID$ é o id do AP ao qual o CID deve ser associado. Paralelamente, solicita ao VS que inicie um novo fluxo do vídeo VID tendo como destino o cliente CID através do pacote de controle $token3 (CID, VID)$. Depois de, respectivamente, enviar/receber o último pacote de vídeo, tanto o VS quanto o cliente CID enviam para o WCM um pacote de controle $token1$ com $VID=NULL$, confirmando a liberação da largura de banda previamente alocada para a transmissão do fluxo de vídeo.

Por outro lado, quando a requisição é rejeitada, o WCM envia um pacote de controle $token2$ com $APID=NULL$ para o cliente CID .

3.2.3 Operação Interna do WCM com Alocação Imediata

Conforme mencionado anteriormente, o WCM implementa a heurística LLF+, versão da *Least Loaded First* (LLF) [14] modificada com o intuito de garantir largura de banda mínima. Para prover este serviço, o WCM emprega um vetor – $FreeBandwidth[n]$ – onde

```

For  $i$  from 1 to  $AP_{total}$  do
  Set FreeBandwidth[ $i$ ] =  $AP_{throughput_i}$ 
For each token ( $CID, VID$ ) received do
  If  $VID = NULL$  then do
    Set FreeBandwidth[ $C_{apCID}$ ] +=  $V_{rateC_{videoCID}}$ 
  Otherwise, do
    Set  $APID = NULL$ ; MaxBandwidth = 0
    For  $i$  from 1 to  $AP_{total}$  do
      If  $V_{rateVID} \leq \text{FreeBandwidth}[i] > \text{MaxBandwidth}$  then do
        Set  $APID = i$ ; MaxBandwidth = FreeBandwidth[ $i$ ]
    If  $APID \neq NULL$  then do
      Set FreeBandwidth[ $i$ ] -=  $V_{rateC_{videoCID}}$ 
      Set  $C_{videoCID} = VID$ ;  $C_{apCID} = APID$ 
      Send token ( $CID, APID$ ) to  $CID$ 

```

Figura 3.4: Pseudo-código do algoritmo do WCM usado no gerenciamento de requisições

guarda a largura de banda disponível em cada um dos n APs co-localizados e executa o pseudo-código da Figura 3.4 para aceitar ou rejeitar as requisições dos clientes.

Inicialmente, todas entradas do vetor FreeBandwidth são preenchidas com a vazão efetiva máxima dos canais (30 Mbps). Depois, o WCM fica a espera de *tokens* de controle enviados por clientes. Quando recebe um *token1* de requisição de vídeo, o WCM percorre FreeBandwidth para encontrar o *APID* do AP menos carregado, isto é, com maior largura de banda disponível. Caso a largura de banda disponível do AP *APID* seja suficiente para a transmissão de um fluxo do vídeo requisitado, a requisição será aceita e FreeBandwidth[*APID*] será decrementado de acordo com a taxa do vídeo. Quando recebe um *token1* de liberação de banda, o WCM atualiza a entrada FreeBandwidth correspondente ao AP usado na transmissão do vídeo para o cliente.

3.3 Análise Experimental

Esta seção investiga os limites de escalabilidade do sistema VoD proposto, baseado na heurística LLF+. Mais especificamente, são descritos a metodologia de avaliação e o cenário de simulação (que servem de base para a maioria dos próximos capítulos), seguida da análise dos resultados obtidos.

3.3.1 Metodologia de Avaliação

Para avaliar o SWVoD proposto foi desenvolvida uma ferramenta de simulação de eventos discretos [25], denominada TCHE (Detalhada no Apêndice A). Foram definidas duas principais métricas para quantificar o desempenho do sistema: taxa de bloqueio e taxa de ocupação.

A taxa de bloqueio (*Blockage Rate - BR*) serve como um indicador significativo da escalabilidade de um sistema de VoD. Define-se *BR* da seguinte maneira:

$$BR = \frac{R_{denied}}{R_{total}} \quad (3.2)$$

onde R_{total} representa o total de requisições de vídeo feitas pelos clientes e R_{denied} é o número de requisições que o WCM não pôde atender por indisponibilidade de recursos suficientes. Logo, quanto menor é *BR* para uma determinada quantidade de recursos, maior é a escalabilidade do sistema VoD.

A taxa de ocupação (*Occupation Rate - OR*) demonstra o quão eficientemente o sistema usa a largura de banda agregada. *OR* é dada por:

$$OR = \frac{PB}{AB} \quad (3.3)$$

onde *PB* é a largura de banda de pico e *AB* é a largura de banda agregada dos APs co-localizados, conforme descrito no modelo do problema do controle de associação. Logo, quanto mais próxima *OR* for de um, mais efetivo é o uso da largura de banda agregada.

Note que o uso destas duas métricas é complementar. Por exemplo, uma ocorrência conjunta de *BR* maior que zero e *OR* menor do que um significa que o sistema não está sendo eficiente na tarefa de alocação dos recursos disponíveis.

3.3.2 Cenário de Simulação

As simulações assumem um cenário onde centenas a milhares de potenciais clientes – usuários de dispositivos/estações móveis (STA) com capacidade para exibição de vídeos – estão distribuídos sobre uma área (200x200 m²) inteiramente coberta pelos APs co-localizados (posicionados exatamente no meio da área de simulação). Por exemplo, além do exemplo de praças de alimentação apresentado no Capítulo 1, este cenário pode representar também eventos esportivos em estádios, centros de convenções, terminais de aeroportos, e muitos outros em que a densidade de clientes é alta e a mobilidade baixa. Como explicitado na modelagem do problema, considera-se que a chegada de requisições

Tabela 3.1: Parâmetros de Simulação

Parâmetro	Padrão	Variação
Tempo de Simulação - TS - (s)	3600	N/A
APs Co-localizados - AP_{total} - (unidades)	16	1, 2, 4, 8, 16
Vazão do AP - $AP_{throughput}$ - (Kbps)	30720	N/A
Duração do Vídeo - V_{length} - (s)	1200	60, 120, 240, 360, ..., 1200
Taxa do Vídeo - V_{rate} - (Kbps)	1024	N/A
Vídeos - V_{total} - (unidades)	100	N/A
Taxa de Chegada - λ - (requisições/min)	60	1, ..., 9, 10, ..., 60

de clientes segue um processo de Poisson⁸ com um dado λ e a escolha dos vídeos segue uma distribuição Zipf com $\alpha = 0.7$ [19].

3.3.3 Avaliação de Desempenho

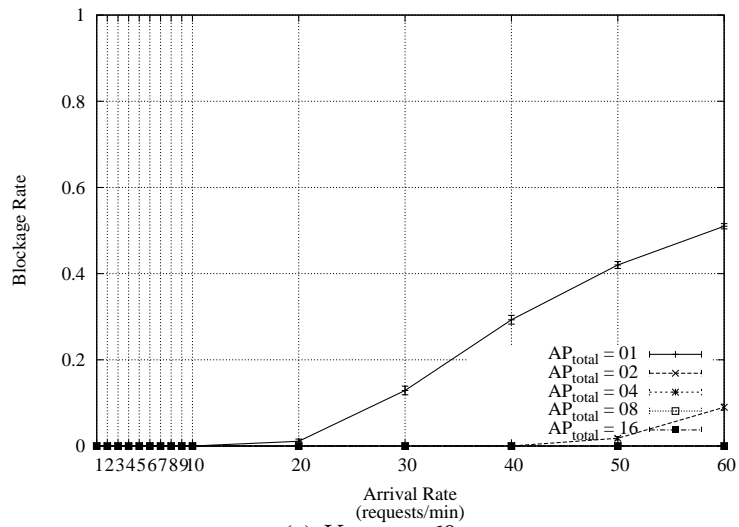
Nesta avaliação, a análise é restrita a APs com mesma vazão efetiva e concentrada em vídeos de mesma duração e taxa, variando entre um e vinte minutos, os quais provavelmente serão mais populares em ambientes com dispositivos móveis e portáteis, especialmente porque os dispositivos sem fio apresentam restrições de bateria. Todos os gráficos de desempenho indicam as médias aritméticas com intervalos de confiança de 95% (representados nos gráficos por barras de erros) baseadas em dez iterações usando diferentes sementes para cada combinação dos parâmetros de simulação sumarizados na Tabela 3.1.

Note que, embora os resultados sejam mostrados para múltiplos vídeos, o comportamento esperado é o mesmo que o de um único vídeo (para cada V_{length} simulada). A razão para isso é que a cada execução do simulador, é alterado apenas um parâmetro, o que resulta em um acervo homogêneo onde os N vídeos têm a mesma duração e taxa⁹.

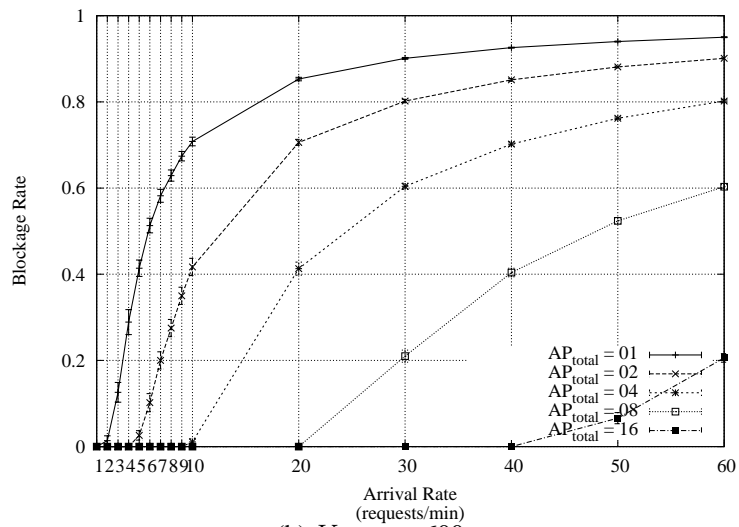
As Figuras 3.5 e 3.6 mostram em detalhes o impacto da quantidade de APs e da taxa de chegada na taxa de bloqueio (BR) e na taxa de ocupação (OR), respectivamente, para três durações de vídeo (menor = 60 s, intermediária = 600 s e maior = 1200 s). A curva superior representa os resultados para um único AP. A próxima curva representa os resultados obtidos com dois APs e assim sucessivamente. Em particular, as curvas de

⁸Embora resultados empíricos recentes [92], coletados a partir de um sistema VoD de grande escala instalado na China Telecom, sugiram que qualquer modelo de simulação de sistemas VoD baseado em uma distribuição de Poisson resulta em um sistema sobre-provisionado.

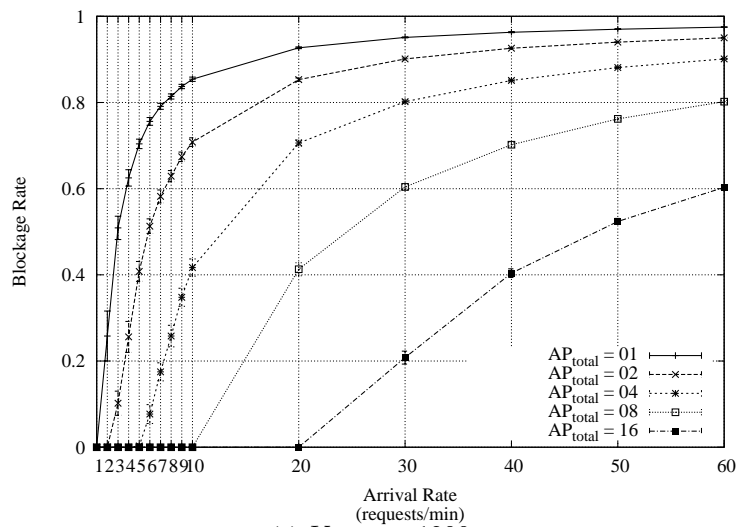
⁹A avaliação de desempenho do sistema proposto para acervos heterogêneos compostos por múltiplos vídeos de diferentes durações e taxas caracteriza-se como uma trabalho futuro potencialmente relevante.



(a) $V_{length} = 60$ s

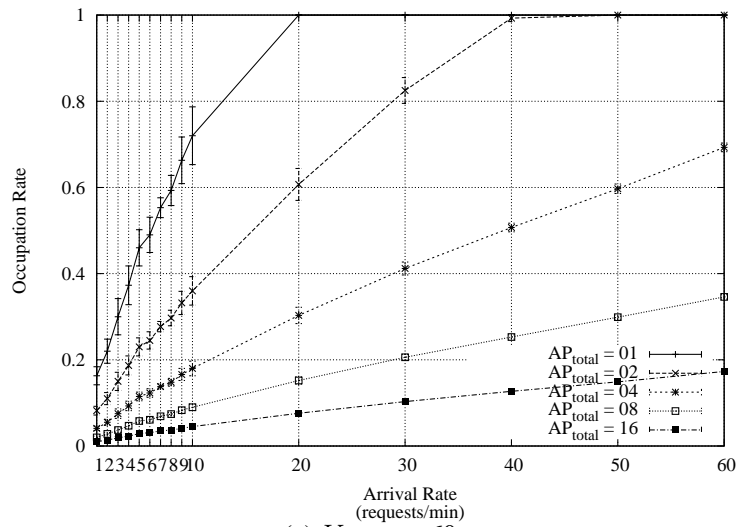


(b) $V_{length} = 600$ s

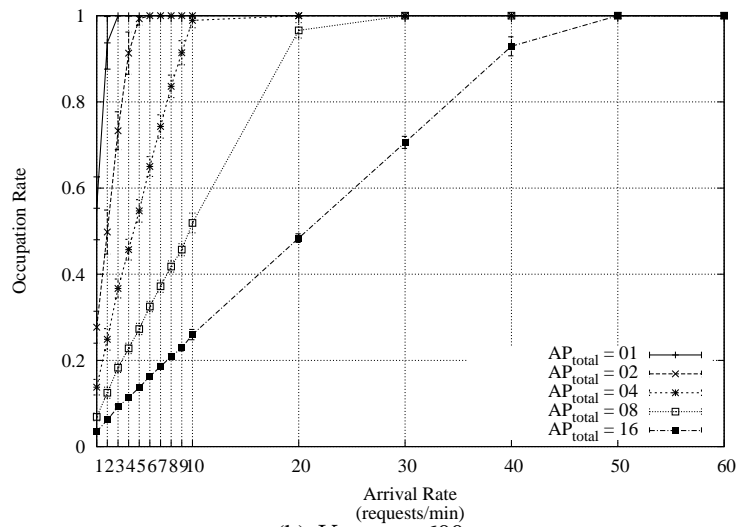


(c) $V_{length} = 1200$ s

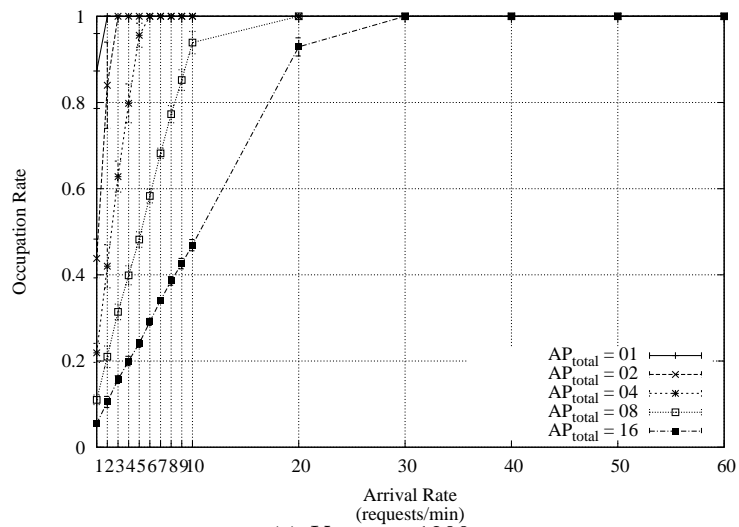
Figura 3.5: Impacto de λ e AP_{total} em BR para V_{length} de 60, 600 e 1200 s



(a) $V_{length} = 60$ s



(b) $V_{length} = 600$ s



(c) $V_{length} = 1200$ s

Figura 3.6: Impacto de λ e AP_{total} em OR para V_{length} de 60, 600 e 1200 s

Tabela 3.2: Mínima taxa de chegada (MAR) onde $R_{denied} > 0$

AP_{total}	V_{length}										
	60	120	240	360	480	600	720	840	960	1080	1200
1	20	9	5	3	3	2	2	2	2	2	1
2	50	20	10	7	6	5	4	4	3	3	3
4	–	50	30	20	20	10	8	7	6	6	5
8	–	–	60	40	30	30	20	20	20	20	20
16	–	–	–	–	60	50	40	30	30	30	30

BR para o número máximo de APs estão, em muitos casos, inteiramente sobre o eixo X, pois a capacidade de largura de banda agregada proporcionada pelos APs co-localizados permitiu ao sistema VoD aceitar todas as requisições recebidas.

Outra importante medida derivada de BR é a mínima taxa de chegada (*Minimum Arrival Rate - MAR*) na qual a combinação da duração de vídeo (V_{length}) e quantidade de APs (AP_{total}) força o WCM a rejeitar requisições devido a indisponibilidade de largura de banda suficiente para o atendimento. A Tabela 3.2 apresenta os valores coletados de MAR .

De acordo com as curvas das Figuras 3.5 e 3.6, assim como em relação aos valores da Tabela 3.2, um único AP foi suficiente para viabilizar o atendimento de todas as requisições de clientes ($BR = 0$), para todas as durações de vídeo testadas, para taxas de chegada (λ) inferiores a duas requisições por minuto ($OR < 1$ nestes casos).

Conforme o crescimento de λ , o número de APs co-localizados precisou ser aumentado para evitar rejeições de requisições. Para λ de até 3600 requisições por hora (60 por minuto) e vídeos com até 360 segundos de duração, a largura de banda agregada disponibilizada por 16 APs foi suficiente.

Entretanto, para vídeos mais longos (a partir de 480 s) o sistema teve que rejeitar requisições. Para a máxima taxa de chegada medida, o sistema teve um desempenho sofrível ($BR > 0.2$) para vídeos com duração superior a 600 segundos, chegando a uma rejeição de 60% das requisições para vídeos de 1200 segundos. Este comportamento é salientado na Figura 3.7, que ilustra graficamente a limitação imposta por vídeos de longa duração quando usado o número máximo de APs co-localizados (16 unidades) e a maior taxa de chegada testada (60 requisições/min).

Além disso, a análise da taxa de ocupação (OR) nos casos em que $R_{denied} > 0$ mostrou

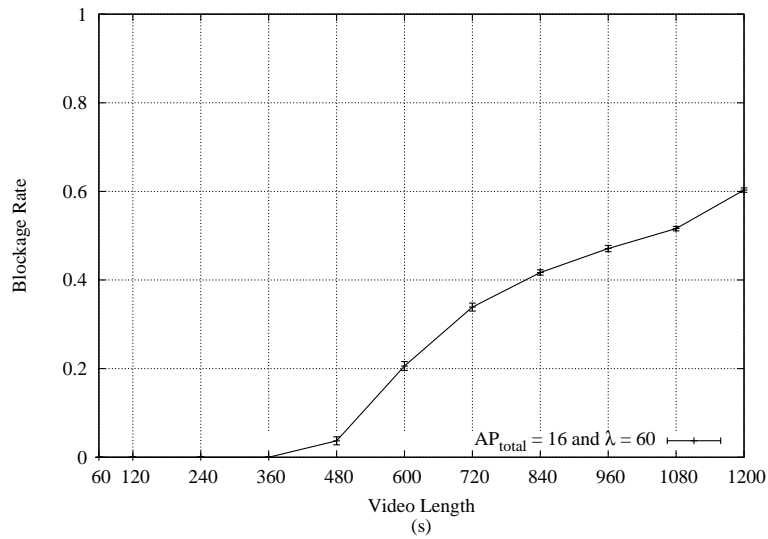


Figura 3.7: Limite de desempenho imposto pelo tamanho do vídeo com alta taxa de chegada

que o seu valor foi sempre igual a um. Esta constatação confirma o uso efetivo que o sistema VoD proposto fez da largura de banda agregada disponível.

Cabe ressaltar também o comportamento escalável do sistema do ponto de vista de taxa de chegada. Para uma mesma duração de vídeo, a taxa de bloqueio obtida com uma determinada combinação de quantidade de APs e taxa de chegada é mantida quando ambas crescem ou diminuem na mesma proporção. Por exemplo, na Figura 3.5, os resultados com $V_{length} = 1200$ s mostram que a BR para λ igual a 5, 10, 20 e 40 req./min foi aproximadamente a mesma para 2, 4, 8 e 16 APs, respectivamente. Além disso, note que este valor de taxa de bloqueio também foi verificado com $V_{length} = 600$ s, mas com a metade dos APs (1, 2, 4 e 8 unidades), mostrando a escalabilidade do sistema do ponto de vista da duração. Ou seja, quando possível, a duplicação na quantidade de APs permitiria que o sistema oferecesse o mesmo desempenho de aceitação de requisições em aplicações que demandassem vídeos com o dobro da duração ou nas quais a taxa de chegadas fosse o dobro.

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi proposto e avaliado um novo modelo para sistemas VoD escaláveis em redes sem fio (SWVoD) baseado no padrão IEEE 802.11, capaz de oferecer garantia de QoS através de reserva de recursos e minimização de latência de serviço. Além disso, o sistema SWVoD proposto atinge um desempenho escalável através do emprego de pontos

de acesso co-localizados, operando em canais não sobrepostos, e de um esquema simples mas eficiente de gerenciamento da associação de clientes aos APs, implementado em nível de aplicação tendo como base a heurística genérica LLF+, variação de *Least Loaded First* (LLF) modificada para garantir largura de banda mínima.

Os resultados simulados demonstraram que este sistema SWVoD utiliza efetivamente a largura de banda agregada disponibilizada pelos APs, permitindo que uma taxa de bloqueio baixa seja atingida para vídeos de até 360 segundos. Estes resultados sugerem que este sistema pode ser uma solução atrativa para várias classes de aplicações de VoD escalável que necessitam de garantias de QoS como trailers de filmes, notícias, videoclipes e comerciais, notoriamente de curta duração. Entretanto, como o sistema não é eficiente para vídeos de mais longa duração (maior que 360 s) combinados com alta taxa de chegada, novas soluções precisam ser investigadas para contornar esta limitação.

Neste contexto, podem ser enumeradas as seguintes contribuições específicas deste capítulo:

1. Modelagem do problema do controle de associação em sistemas VoD que adotam APs co-localizados para transmitir fluxos de vídeo em WLANs para grandes audiências;
2. Proposta de um novo modelo para sistemas VoD em redes IEEE 802.11 WLANs capaz de explorar eficientemente, no nível de aplicação, a largura de banda agregada de APs co-localizados enquanto provê garantias de largura de banda mínima através de um mecanismo de reserva atrelado ao procedimento de controle de associação;
3. Avaliação detalhada sobre o desempenho escalável do sistema VoD proposto para diferentes combinações de duração de vídeo e taxas de chegada de requisições de vídeo;
4. Demonstração de que o sistema VoD projetado é capaz de eliminar a latência de serviço e de atender milhares de requisições por hora para vídeos de curta duração, caso típico de muitas aplicações VoD onde trailers de filmes, clipes de divulgação, entre outros onde vídeos curtos precisam ser transmitidos com QoS e baixa latência.

No próximo capítulo são propostas novas heurísticas focadas na aplicação alvo desta tese, ou seja, capazes de explorar características particulares de VoD para aumentar a escalabilidade do sistema proposto, isto é, atender mais requisições com a mesma quantidade de recursos.

Capítulo 4

Sistema com Heurísticas Focadas na Aplicação

No capítulo anterior foi proposto e avaliado um sistema inovador para VoD escalável em redes 802.11, no qual pontos de acesso co-localizados (*collocated access points*) operam em canais não sobrepostos orquestrados, em nível de aplicação, pelo gerente de canais sem fio (*Wireless Channel Manager - WCM*), um componente centralizado responsável pelo controle de associação de clientes aos APs, o qual garante largura de banda mínima através de mecanismos de reserva efetivos.

Conforme os resultados apresentados, a heurística de controle de associação genérica usada pelo WCM se mostrou ineficiente para cenários com vídeos longos e com alta taxa de chegada de requisições. Visando contornar esta limitação, neste capítulo é investigado um novo sistema baseado na proposta de heurísticas focadas na aplicação (*application-friendly*), denominado CINAPS (*Cluster of INexpensive Access PointS*). Especificamente, no CINAPS são introduzidas e avaliadas duas novas heurísticas, denominadas *Early Released First* (ERF) e *Bounded ERF* (BERF), que exploram a característica de aplicações VoD conhecida como “Fator de Paciência” (*Patience Factor - PF*), abordada com detalhes no Capítulo 2, para criar um procedimento de reserva preguiçosa de sub-canais para os clientes com um tempo de serviço bem definido.

Dentro deste contexto, são descritas abaixo as diferenças relevantes existentes na nova modelagem do problema, caracterizada pela incorporação do PF (mas sob mesmas premissas), e no projeto do CINAPS, principalmente no que se refere ao protocolo de sinalização e a dinâmica do WCM, modificada significativamente com a introdução das heurísticas ERF e BERF. Após, é apresentada a avaliação experimental executada através da ferramenta de simulação TCHE¹, seguida das considerações finais.

¹Apresentação detalhada de TCHE no Apêndice A.

4.1 Controle de Associação Focado na Aplicação

Basicamente, o modelo do problema do controle de associação focado na aplicação em sistemas SWVoD baseados em APs Co-localizados é uma extensão do modelo genérico apresentado no capítulo anterior com a incorporação do “Fator de Paciência” (*Patience Factor* - PF), tal que PF_i corresponde a máxima latência de serviço (SL) considerada aceitável pelo iésimo cliente.

Em decorrência desta nova definição, somada às anteriores, no presente modelo estendido uma nova requisição proveniente do iésimo cliente é aceita apenas se for possível alocar em um dos APs a largura de banda necessária ($V_{rate_{C_{video_i}}}$) tal que a condição $SL_i \leq PF_i$ seja respeitada. Caso contrário, a requisição é negada. Logo, neste novo modelo, a quantidade de $R_{accepted}$ e R_{denied} passa a depender não apenas da disponibilidade de largura de banda nos APs (função de λ , V_{length} , V_{rate} e AB), mas também do PF .

4.2 Proposta do Sistema CINAPS

Apesar de adotar a mesma arquitetura de *hardware/software* do capítulo anterior, o novo sistema SWVoD – chamado de CINAPS (*Cluster of INexpensive Access PointS*) – apresenta pequenas alterações no protocolo de sinalização causadas por uma significativa alteração na dinâmica de gerenciamento de largura de banda empreendida pelo WCM, conforme exposto a seguir.

4.2.1 Procedimento de Controle de Associação Estendido

O procedimento de controle de associação estendido segue o protocolo ilustrado na Figura 4.1. Assim como no protocolo exposto no capítulo anterior, toda vez que um cliente requisita um vídeo, o seu VP envia um pacote de controle *token1* (CID, VID) para o WCM no tempo $T_{request_{CID}}$ através de qualquer um dos APs, onde CID e VID são, respectivamente, o id do cliente e o id do vídeo. Dependendo da largura de banda disponível nos APs co-localizados e do PF^2 , o WCM aceita ou rejeita a requisição.

Diferentemente da sinalização usada anteriormente, o WCM, sempre que aceita uma requisição, envia um pacote de controle *token2* para o cliente CID , seguindo um novo formato ($CID, T_{service_{CID}}, APID$), onde $T_{service_{CID}}$ é o tempo no qual largura de banda

²Note que é assumido que o PF é único para todos os clientes e conhecido *a-priori* pelo WCM. Entretanto, para relaxar esta condição bastaria incrementar o *token1* para ($CID, T_{service_{PF}}, VID$), onde $T_{service_{PF}}$ representa o PF considerado aceitável pelo cliente CID .

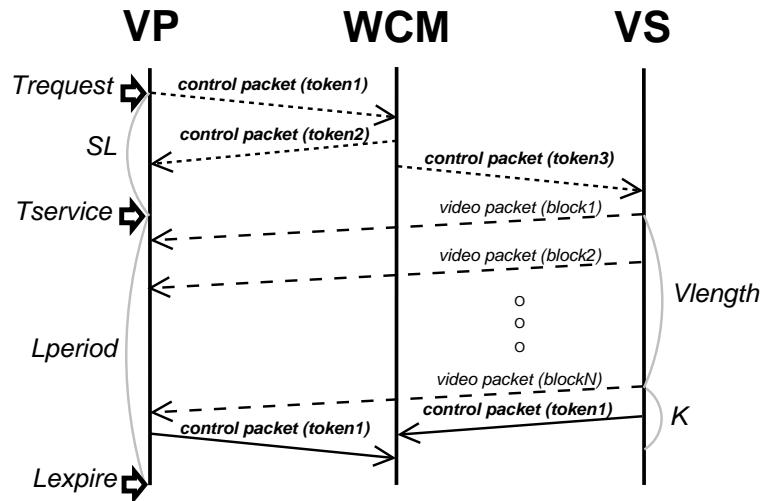


Figura 4.1: Protocolo de controle de associação estendido

é efetivamente alocada para o cliente CID e $APID$ é o id do AP ao qual o CID deve ser associado. O WCM também solicita ao VS que inicie um novo fluxo do vídeo VID tendo como destino o cliente CID no tempo $T_{service_{CID}}$ através do pacote de controle $token3(CID, VID, T_{service_{CID}})$. Depois de receber o último pacote de vídeo, o cliente CID envia para o WCM um pacote de controle $token1$ com $VID=NULL$, apenas para confirmar a liberação da largura de banda (o que também pode ser feito pelo VS, como explicado no capítulo anterior).

Além disso, no novo protocolo, quando a requisição é rejeitada, o WCM envia um pacote de controle $token2$ com $T_{service_{CID}}=NULL$ e $APID=NULL$ para o cliente CID .

4.2.2 Operação Interna do WCM com Alocação Preguiçosa

Para cumprir a tarefa de controle de associação, o WCM adota o conceito de *lease*³ de sub-canais. Quando a requisição do cliente CID para o vídeo VID é aceita, com a indicação de associação ao AP $APID$, o WCM fornece um *lease* de um sub-canal do $APID$ para este cliente, isto é, uma fração da largura de banda total do AP $APID$ (no máximo $AP_{throughput_{APID}}$) durante um período específico de tempo, denominado “Período de *Lease*” (*Lease Period* - L_{period}), ilustrado na Figura 4.1. Como mencionado anteriormente, devido ao comportamento regular de aplicações baseadas em VoD, é esperado que o cliente, tendo requisitado um determinado vídeo VID , assistirá a este vídeo completamente. Para sistemas VoD que utilizam taxa de transmissão igual a taxa do vídeo

³Um *lease* é um contrato que garante ao seu detentor direitos específicos de propriedade por período limitado de tempo [26].

($V_{rate_{VID}}$), é suficiente alocar uma fração do canal (um pseudo “sub-canal”) com largura de banda proporcional a $V_{rate_{VID}}$ no tempo $T_{service_{CID}}$, por um período de tempo (L_{period}) proporcional a duração do vídeo $V_{length_{VID}}$. Conseqüentemente, o tempo de liberação do sub-canal ocupado pelo cliente CID , doravante expresso como “Tempo de Expiração de Lease” (*Lease expiration time* - $L_{expire_{CID}}$), é igual a $T_{service_{CID}} + V_{length_{VID}} + K^4$.

A manutenção dos *leases* é feita através de uma estrutura simples, a lista de liberação (*Release List* - RL). As entradas da RL possuem os seguintes campos:

RL_{cid} , que armazena o id do cliente (CID);

RL_{vid} , que armazena o id do vídeo (VID) requisitado por CID ;

RL_{apid} , que armazena o id do AP ($APID$) ao qual CID está ou será associado;

RL_{dep} , que armazena a relação de dependência entre clientes (explicada a seguir);

RL_{time} , que armazena o *Lease expiration time*, que define o tempo no qual o sub-canal alocado para CID será liberado ($L_{expire_{CID}}$).

Toda vez que uma requisição do cliente CID para o vídeo VID é aceita, uma nova entrada é criada na RL , com $RL_{time} = L_{expire_{CID}}$ e $RL_{dep} = NULL$, de modo que a ordem crescente de RL_{time} seja preservada.

Como descrito anteriormente, $T_{service_{CID}}$ precisa ser definido para que $L_{expire_{CID}}$ possa ser computado. Para isso, o WCM verifica qual é o AP menos carregado e se este possui largura de banda disponível suficiente para acomodar $V_{rate_{VID}}$. Se existir, $T_{service_{CID}}$ é definido como zero e a requisição é atendida imediatamente sem ter que esperar pela liberação de largura de banda. Neste caso, a requisição não possui dependência em relação a requisições anteriores.

Por outro lado, quando a requisição não pode ser atendida imediatamente, o WCM recorre a RL para encontrar o chamado “*Earliest AP*” (EAP), isto é, o AP que mais cedo liberará largura de banda suficiente para satisfazer os requisitos do vídeo requisitado.

Para descobrir o EAP , é suficiente que o WCM percorra a RL somando, separadamente para cada um dos APs, a largura de banda ($V_{length_{RL_{vid}}}$) das entradas válidas⁵ – correspondentes a clientes mais antigos – até que a soma de largura de banda de algum

⁴Constante – definida arbitrariamente como sendo um segundo – empregada para esconder um possível atraso durante o processo de aquisição/liberação do sub-canal.

⁵Uma entrada é considerada válida se o seu campo RL_{dep} continua $NULL$, significando que não existem requisições que dependam dela.

dos APs seja igual ou maior que $V_{rate_{VID}}$. Quando isto ocorre, EAP e $T_{service_{CID}}$ recebem os valores da última entrada analisada, respectivamente RL_{apid} e RL_{time} , gerando uma relação de dependência entre a nova requisição (considerando que esta foi aceita com uma latência de serviço menor que o PF) e uma ou mais requisições anteriores. Para manter a RL atualizada, todas as entradas válidas com $RL_{apid} = EAP$ que foram percorridas precisam ter seus campos RL_{dep} preenchidos com CID . No caso de todos os vídeos possuírem a mesma taxa ($MaxV_{rate} = MinV_{rate}$), de todos APs apresentarem a mesma vazão efetiva ($MinAP_{throughput} = MaxAP_{throughput}$) e da vazão efetiva ($AP_{throughput}$) ser um múltiplo da taxa do vídeo (V_{rate}), basta consultar a primeira entrada válida para descobrir o EAP . Nos demais casos, o número máximo de entradas válidas que precisará ser percorrido para descobri-lo será de $\frac{AP_{total} * MaxV_{rate}}{MinV_{rate}}$. Daqui em diante, este procedimento é referenciado como *DiscoverEAP*.

A principal razão para armazenar as dependências entre requisições (na primeira proposta do CINAPS [63] não havia esta preocupação) é permitir que o WCM consiga tratar de forma eficiente a ocorrência de “usuários voláteis” (*volatile users*)⁶. Como consequência, quando um cliente pára de assistir o vídeo antes do seu final, clientes que tenham uma relação de dependência com o cliente volátil podem ter seus RL_{time} atualizados. Além disso, se outro cliente possui uma dependência em relação ao cliente cuja entrada foi atualizada, este também deve ser atualizado, e assim por diante, recursivamente. Note que existe um caso especial que pode ocorrer quando clientes estão esperando pela expiração de um *lease* em um determinado AP enquanto outro AP possui largura de banda disponível. Isto ocorre porque uma vez que o cliente segue o procedimento de controle de associação (protocolo de sinalização estendido) e é incluído na lista de liberação, ele recebe o $APID$ e se reassocia a este AP. Para superar esta limitação, pode-se optar por estender o protocolo de sinalização de modo que um novo *token2* possa ser enviado para o cliente, permitindo que este comute para o AP com largura de banda disponível. Outra questão que surge é em relação a expectativa do usuário, que implica em ter que considerar uma capacidade de armazenamento temporário no usuário proporcional ao PF. Isto é necessário porque o usuário é inicialmente avisado sobre uma determinada latência de serviço, a qual poderá ser encurtada devido a um usuário volátil na sua cadeia de dependência. Usando esta abordagem, o cliente pode escolher entre começar a assistir o vídeo imediatamente ou a partir do instante previamente escalonado.

Neste contexto, o novo WCM implementa três heurísticas, sendo uma genérica –

⁶Usuários que cancelam a requisição de vídeo após receber o *lease* do sub-canal.

LLF+, usada na proposta anterior – e duas focadas na aplicação – as inovadoras *Early Release First* (ERF) e *Bounded ERF* (BERF), que permitem a aceitação de requisições para uso futuro dos APs. A seguir, ERF e BERF são descritas em detalhes.

A heurística ERF prioriza a escolha do canal que será liberado mais cedo para o atendimento das requisições nos momentos em que não existe largura de banda livre suficiente para alocação imediata. ERF se beneficia da tolerância a latência de serviço de aplicações de VoD⁷ que permite criar procedimento de associação preguiçosa de clientes aos APs em períodos nos quais os canais ficam completamente ocupados. Quando isto acontece, as requisições dos clientes são enfileiradas e atendidas em um tempo futuro, no instante em que largura de banda suficiente se torna disponível. A questão chave para esta heurística é que, devido ao comportamento regular da aplicação, o tempo no qual passará a existir largura de banda suficiente é facilmente previsto pelo sistema. Em particular, esta característica permite informar ao cliente, no momento da requisição, a latência de serviço a qual estará submetido.

A heurística BERF é uma extensão de ERF que oferece garantia de latência máxima. Para isso, a requisição do cliente será aceita apenas se a latência de serviço não for maior que o “Fator de Paciência” (PF), descrito anteriormente. Note que o ERF pode ser visto como um BERF com $PF=\infty$, enquanto LLF+ funciona de maneira similar ao BERF com $PF=0$.

Além da estrutura da lista de liberação (RL), o WCM emprega, assim como na proposta anterior, um vetor – $FreeBandwidth[n]$ – para manter a largura de banda livre de cada um dos n APs co-localizados e utiliza o algoritmo da Figura 4.2 para aceitar ou rejeitar as requisições, dependendo da heurística (H) adotada. Note que, enquanto no sistema proposto anteriormente o valor mínimo das entradas do vetor $FreeBandwidth$ era zero, no CINAPS com ERF ou BERF os valores podem eventualmente tornar-se negativos.

4.3 Análise Experimental

Nesta seção é investigado o impacto das novas heurísticas de controle de associação no desempenho do sistema CINAPS. É descrita a metodologia de avaliação adotada (considerando o mesmo cenário de simulação do capítulo anterior), seguida da exposição dos resultados obtidos.

⁷Clientes usualmente toleram uma latência entre a requisição do vídeo e o início do recebimento do vídeo.

```

For  $i$  from 1 to  $AP_{total}$  do
  Set  $FreeBandwidth[i] = AP_{throughput_i}$ 
For each  $token1$  received do
  If  $VID = NULL$  then do
    Set  $FreeBandwidth[C_{apCID}] += V_{rateC_{videoCID}}$ 
  Otherwise, do
    Set  $APID = NULL; T_{serviceCID} = NULL; MaxBandwidth = 0$ 
    For  $i$  from 1 to  $AP_{total}$  do
      If  $V_{rateVID} \leq FreeBandwidth[i] > MaxBandwidth$  then do
        Set  $C_{videoCID} = VID; C_{apCID} = i; APID = i$ 
        Set  $T_{serviceCID} = 0; MaxBandwidth = FreeBandwidth[i]$ 
    If  $APID = NULL$  and  $H \neq LLF+$  then do
      Set  $APID = DiscoverEAP$ 
    If  $H = BERF$  and  $SL_{CID} > PF_{CID}$  then do
      Set  $APID = NULL; T_{serviceCID} = NULL$ 
    If  $APID \neq NULL$  then do
      Set  $FreeBandwidth[i] -= V_{rateC_{videoCID}}$ 
    Send  $token2$  to  $CID$ 

```

Figura 4.2: Pseudo-código do algoritmo usado pelo WCM no CINAPS

4.3.1 Metodologia de Avaliação

Assim como no capítulo anterior, a avaliação é baseada na ferramenta TCHE (Apêndice A) de simulação de eventos discretos. Foram definidas duas principais métricas para quantificar o desempenho do sistema. A primeira, taxa de bloqueio (*Blockage Rate - BR*), que serve como um indicador significativo da escalabilidade de um sistema VoD, definida no capítulo anterior. A segunda, latência média (*Average Latency - AL*), mede o quão longe está o sistema em relação a um sistema TVoD, descrito anteriormente. *AL* é dada por:

$$AL = \frac{\sum_{i=1}^{R_{accepted}} SL_i}{R_{accepted}} \quad (4.1)$$

onde $R_{accepted}$ é o número total de requisições de vídeo aceitas pelo WCM e SL_i é a latência de serviço (*Service Latency*) da requisição i , relativa ao intervalo de tempo decorrido entre o momento da requisição e o momento da alocação efetiva de um subcanal para atender i .

4.3.2 Avaliação de Desempenho

Assim como no capítulo anterior, a análise é restrita a APs com mesma vazão efetiva e concentrada em vídeos de mesma duração e taxa, variando entre um e vinte minutos. To-

Tabela 4.1: Parâmetros de Simulação

Parâmetro	Padrão	Variação
Tempo de Simulação - TS - (s)	3600	N/A
APs Co-localizados - AP_{total} - (unidades)	16	1-16
Vazão do AP - $AP_{throughput}$ - (Kbps)	30720	N/A
Duração do Vídeo - V_{length} - (s)	1200	60-1200
Taxa do Vídeo - V_{rate} - (Kbps)	1024	N/A
Vídeos - V_{total} - (unidades)	100	N/A
Taxa de Chegada - λ - (requisições/min)	60	1-60
Fator de Paciência - PF - (s)	$\frac{V_{length}}{2}$	30-600

dos os gráficos de desempenho indicam as médias aritméticas com intervalos de confiança de 95% (representados nos gráficos por barras de erros) baseadas em dez iterações usando diferentes sementes para cada combinação dos mesmos parâmetros usados anteriormente, somados ao “Fator de Paciência” (cujo valor, para cada iteração, é o mesmo para todos os clientes). A Tabela 4.1 resume os parâmetros de simulação.

A Figura 4.3(a) mostra o efeito da duração dos vídeos (V_{length}) na taxa de bloqueio (BR), fixando-se os valores de taxa de chegada (λ) e número de pontos de acesso (AP_{total}) nos seus valores máximos, 60 req./min e 16 un., respectivamente. Enquanto ERF atingiu $BR = 0$ para todas V_{length} medidas, LLF+ e BERF tiveram comportamentos diferentes dependendo da V_{length} . Para $V_{length} \leq 300$ s, ambas heurísticas tiveram $BR = 0$ porque, usando esta combinação de λ e AP_{total} , o segmento sem fio do sistema apresentou largura de banda agregada (AB) suficiente para o atendimento simultâneo de 480 fluxos de vídeo, enquanto as requisições de vídeo ocorriam a uma taxa média de uma por segundo. Neste caso, considerando $V_{length} = 300$ s, o primeiro cliente liberou o seu sub-canal ao mesmo tempo em que o 301º cliente fez a sua requisição, tal que o sistema operou com uma capacidade ociosa suficiente para 180 fluxos, permitindo que este atendesse todas as requisições imediatamente, sem a necessidade de fazer alocação preguiçosa de sub-canais.

Já no caso em que $V_{length} = 600$ s, foi notado que durante um determinado período de tempo, entre 480 (dado por AB) e 600 (determinado por V_{length}) segundos, todos os sub-canais ficaram ocupados, fazendo com que LLF+ rejeitasse requisições. Isto ocorreu novamente entre 1080 e 1200 s, e assim por diante. Diferentemente, BERF passou a explorar o PF tal que o 481º cliente passou pelo procedimento de associação preguiçosa. Como o primeiro sub-canal a ficar livre foi o ocupado pelo primeiro cliente, o qual foi

liberado depois de 600 s ($RL_{time} = L_{expire_1}$), a latência de serviço (SL) do 481º cliente foi de 120 s ($V_{length} - T_{request_{481}}$), valor inferior ao PF (igual a 300 s neste caso, já que assumiu-se $PF = V_{length}/2$).

O mesmo comportamento ocorreu para os clientes seguintes, até o 960º. Como o 961º precisou esperar pela liberação do sub-canal do 481º cliente ($L_{expire_{481}} = 1200$ s), a sua SL foi de 240 s, ainda inferior ao PF . Este comportamento se repetiu até o 1440º cliente. A partir do 1441º cliente, as requisições de vídeo começaram a ser rejeitadas devido ao $SL > PF$. Por exemplo, o 1441º cliente precisaria esperar pelo 961º cliente ($L_{expire_{481}} = 1800$ s), tal que a sua SL seria de 360 s, superior ao PF em 60 s.

Logo, a próxima requisição aceita só ocorreu no instante de tempo 1500 s ($L_{expire_{961}} - PF$), que coincidiu com a requisição do 1501º cliente. Se esta análise prosseguisse até o final do tempo de simulação, seriam encontrados resultados sinificativamente próximos aos coletados com a ferramenta de simulação (pequenas diferenças são aceitáveis devido a modelagem da chegada de requisições como um processo de Poisson). Embora a diferença de desempenho entre LLF+ e BERF tenha crescido com vídeos de maior duração, o aumento não é proporcional porque este é apenas um dos fatores que afetam o desempenho, conforme será mostrado nas próximas figuras.

Usando a mesma combinação de λ e AP_{total} , a Figura 4.3(b) ilustra o impacto de V_{length} na latência média (AL) experimentada pelos clientes com requisição aceita. Como explicado acima, LLF+ somente aceitou requisições para alocação imediata de sub-canais, tal que $AL = 0$ para todas V_{length} medidas. Diferentemente, ERF e BERF foram influenciadas pela V_{length} . Como mostrado para BR , o mecanismo de alocação preguiçosa não foi necessário para $V_{length} \leq 300$, tal que AL foi zero para esta faixa de valores. Para vídeos com maior duração, enquanto ERF gerou um forte crescimento na AL , BERF manteve a AL abaixo do PF .

A Figura 4.4(a) apresenta a influência de λ em BR , fixando-se os valores de V_{length} e AP_{total} nos seus valores máximo, 1200 s e 16 un., respectivamente. Enquanto as taxas de bloqueio de LLF+ e BERF foram impactadas pelo λ , ERF atingiu $BR = 0$ para todos os valores de λ medidos devido às mesmas razões descritas acima. Como o WCM sempre encontrou um sub-canal livre para $\lambda \leq 20$, BR foi zero para esta faixa de valores, tanto para LLF+ como para BERF. Note que o mesmo raciocínio adotado na análise da Figura 4.3(a) pode ser empregado para entender este comportamento. Para valores mais altos de λ , o mecanismo de alocação preguiçosa provida por BERF foi responsável por uma significativa redução em BR quando comparada a LLF+. Embora BR tenha aumentado

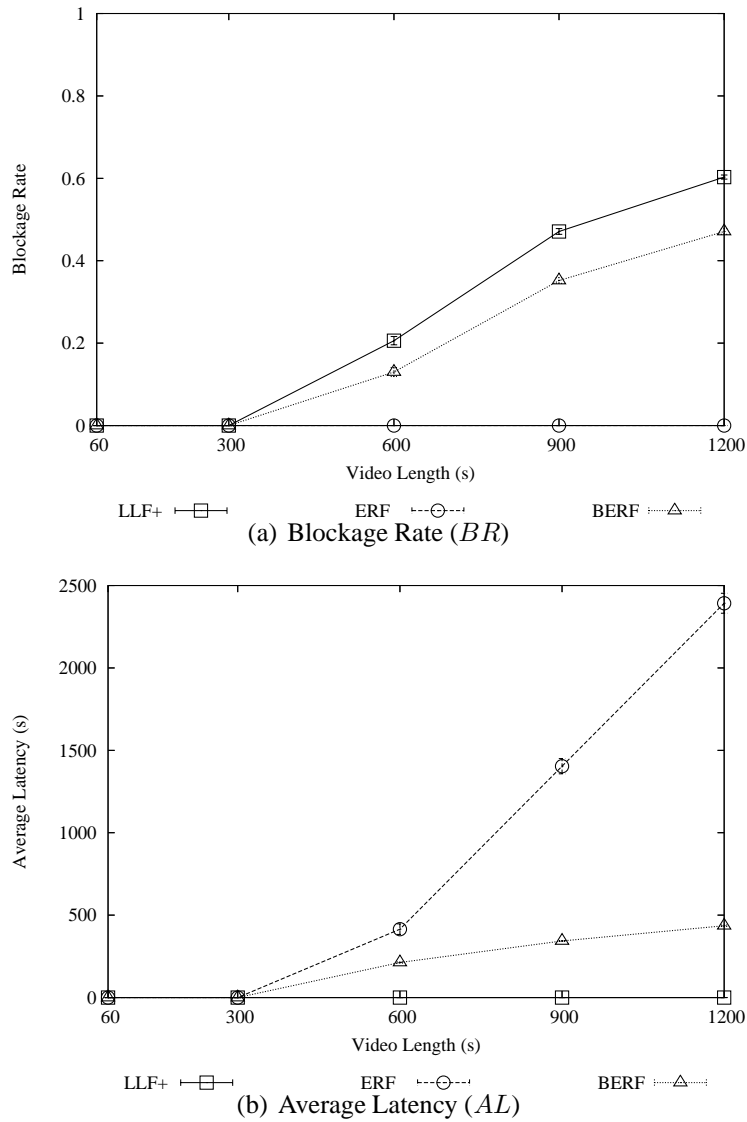


Figura 4.3: Influência de V_{length} nas métricas de desempenho para as três heurísticas com $\lambda = 60$ req./min e $AP_{total} = 16$ unidades

com λ , a diferença entre os seus resultados continuou quase a mesma, isto porque é definida pela combinação de V_{length} , AP_{total} e PF , parâmetros que permaneceram constantes nesta análise.

A Figura 4.4(b) ilustra o impacto de λ em AL . Conforme explicado anteriormente, LLF+ sempre obtém $AL = 0$. Analisando a faixa de valores de λ onde a largura de banda agregada (AB) não foi suficiente para satisfazer todas as requisições ($\lambda > 20$), nota-se que ERF causou um forte crescimento em AL , tal que quanto maior o λ , maior foi a AL . Por outro lado, BERF manteve os valores de AL levemente inferiores ao PF .

A Figura 4.5(a) apresenta o efeito de AP_{total} em BR , fixando V_{length} e λ nos seus valores máximos, iguais a 1200 s e 60 req./min, respectivamente. Enquanto ERF não de-

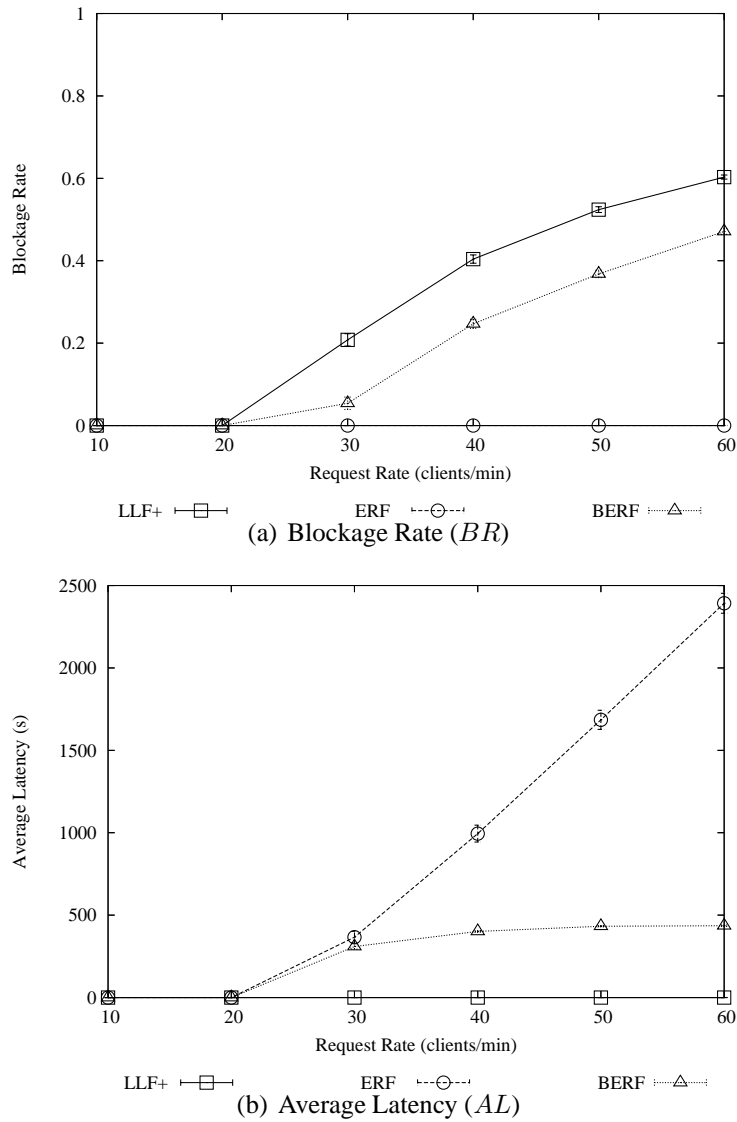


Figura 4.4: Influência de λ nas métricas de desempenho para as três heurísticas com $V_{length} = 1200$ s e $AP_{total} = 16$ unidades

manda comentários adicionais aos já realizados, LLF+ e BERF foram significativamente impactados por AP_{total} , de modo que quanto maior o número de APs, menor foi BR . Note também que o esquema de alocação preguiçosa se tornou mais efetivo conforme cresceu o AP_{total} , o que fez aumentar a diferença de desempenho entre LLF+ e BERF.

Em relação a influência de AP_{total} em AL , a Figura 4.5(b) mostra que, como esperado, BERF manteve AL abaixo do limite imposto pelo PF e ERF obteve uma redução em AL proporcional ao incremento no número de APs (uma redução de 281 s de um para oito APs e 290 s de oito para dezesseis APs).

A Tabela 4.2 resume a taxa de bloqueio máxima (*Maximum Blockage Rate - MaxBR*)

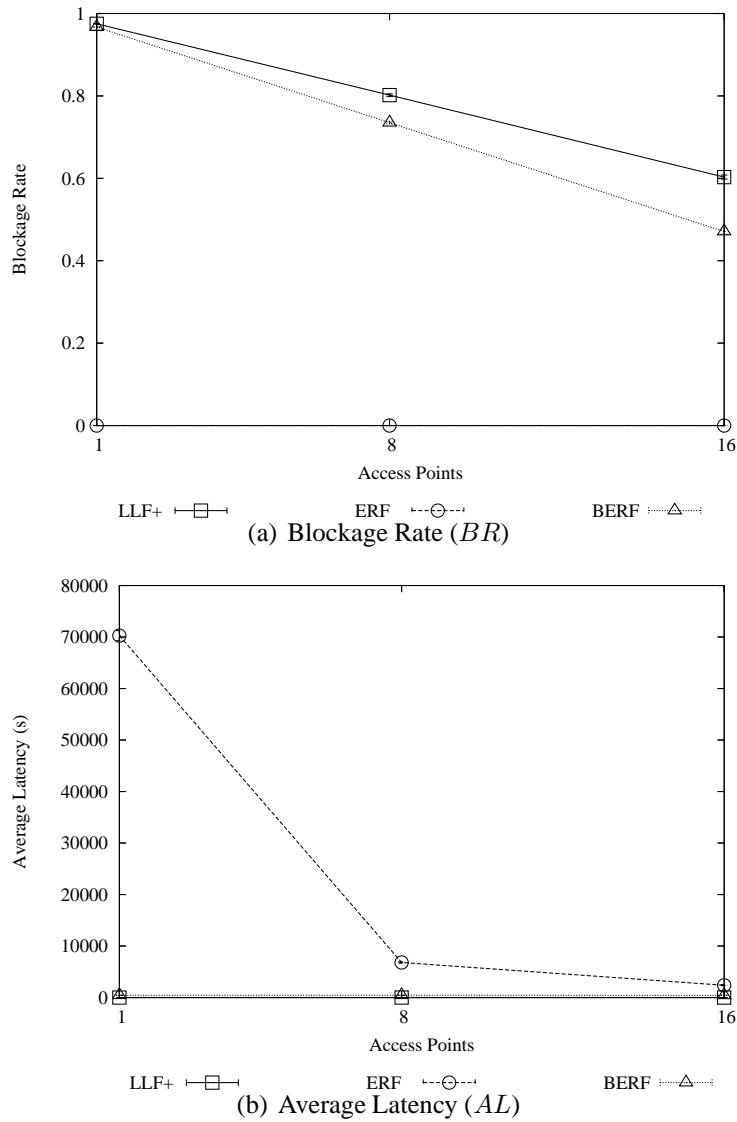


Figura 4.5: Influência de AP_{total} nas métricas de desempenho para as três heurísticas com $V_{length} = 1200$ s e $\lambda = 60$ req./min

para cada combinação de V_{length} e AP_{total} medida para as heurísticas LLF+ e BERF ($PF = V_{length}$). ERF não foi incluída na tabela porque a sua $MaxBR$ foi igual a zero em todas as combinações testadas, já que ERF não rejeita requisições. Comparando BERF e LLF+, pode-se notar claramente que o desempenho de BERF ultrapassou o de LLF+ para todos casos onde a largura de banda agregada não foi suficiente para que o WCM fizesse a alocação imediata de um sub-canal em resposta a requisição do vídeo. Em particular, para vídeos de 1200 s a diferença de desempenho entre elas cresceu na mesma proporção do aumento na largura de banda agregada oferecida pelos APs: 0,008 para um AP, 0,016 para dois APs e assim sucessivamente até o número máximo de APs ser alcançado. Neste

Tabela 4.2: Taxa de bloqueio máxima ($MaxBR$)

AP_{total}	H	V_{length}				
		60 s	300 s	600 s	900 s	1200 s
1	LLF+	0,510	0,901	0,950	0,967	0,975
	BERF	0,505	0,893	0,942	0,959	0,967
8	LLF+	0,000	0,213	0,603	0,735	0,802
	BERF	0,000	0,172	0,537	0,669	0,735
16	LLF+	0,000	0,000	0,206	0,471	0,603
	BERF	0,000	0,000	0,130	0,352	0,471

caso particular, BERF obteve redução superior a 20% na taxa de bloqueio em comparação com LLF+.

Em geral, os resultados indicam que BERF foi significativamente mais escalável que LLF+, especialmente porque sugerem que BERF conseguiu usar mais eficientemente uma quantidade crescente de largura de banda agregada. Embora ERF tenha atingido uma taxa de bloqueio mínima, esta heurística levou a valores inaceitáveis de latência de serviço que só fazem sentido em estudos teóricos. Cabe mencionar também que o perfil de utilização dos APs (OR) nestas três heurísticas foi o mesmo já que as duas novas heurísticas – ERF e BERF – só se diferenciam de LLF+ nos instantes em que a ocupação dos recursos dos APs é total.

4.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi proposto e avaliado o CINAPS (*Cluster of INexpensive Access PointS*), um novo sistema SWVoD que implementa heurísticas de controle de associação a APs colocalizados focadas na aplicação. Em particular, foram desenvolvidas duas novas heurísticas, *Early Released First* (ERF) e *Bounded ERF* (BERF), as quais aproveitam o intervalo de tempo relacionado ao Fator de Paciência presente em aplicações de VoD para que a unidade de controle de associação aceite requisições para uso futuro de canais de comunicação.

Os resultados simulados confirmaram que as novas heurísticas focadas na aplicação introduzidas no CINAPS foram capazes de reduzir substancialmente a taxa de bloqueio de requisições, de modo que o CINAPS superou significativamente o projeto proposto

anteriormente, baseado na heurística genérica LLF+, uma versão de *Least Loaded First* modificada para assegurar garantias de largura de banda mínima para os fluxos de vídeo.

Com base no que foi apresentado, as principais contribuições deste capítulo foram as seguintes:

1. Introdução do “Fator de Paciência” (*Patience Factor* - PF) na modelagem do problema do controle de associação em sistemas SWVoD baseados em APs co-localizados;
2. Proposta do CINAPS, um novo sistema SWVoD que permite a implementação de diferentes heurísticas de controle de associação focadas na aplicação, inclusive com tratamento de usuários voláteis;
3. Desenvolvimento de duas heurísticas focadas na aplicação – chamadas de ERF e BERF – que se beneficiam do PF para implementar um mecanismo de alocação preguiçosa de canais para o atendimento de requisições;
4. Avaliação detalhada do CINAPS, baseada em simulação, comparando o desempenho das novas heurísticas focadas na aplicação com a heurística genérica LLF+ proposta anteriormente.

Como consumo de energia é uma questão significativa em sistemas que envolvem dispositivos móveis operados por bateria, o próximo capítulo estuda o comportamento do sistema proposto com a heurística BERF focando na energia gasta pelas interfaces de rede dos clientes.

Capítulo 5

Sistema Consciente do Consumo de Energia

No capítulo anterior foi proposto e avaliado o CINAPS (*Cluster of INexpensive Access PointS*), um novo sistema VoD escalável para redes sem fio (SWVoD) que implementa heurísticas de controle de associação a APs co-localizados focadas na aplicação, capaz de otimizar o uso da alta capacidade de largura de banda agregada disponível. Dentre as heurísticas introduzidas, *Bounded Early Released First* (BERF) apresentou a melhor solução de compromisso entre taxa de bloqueio e latência média de serviço, beneficiando-se da característica conhecida como “Fator de Paciência” (*Patience Factor* - PF), referente a expectativa que o usuário possui em relação a latência de serviço, ou seja, o período de tempo compreendido entre a requisição do vídeo e o estabelecimento do fluxo (*stream*) de vídeo para o cliente.

Embora a otimização do número de requisições atendidas por sistemas SWVoD seja o principal desafio desta tese, a capacidade limitada das baterias dos dispositivos móveis e o alto consumo de energia de aplicações que envolvem *streaming* de vídeo tornam essencial que os sistemas SWVoD em geral, e o CINAPS em particular, implementem técnicas de economia de energia. Estudos anteriores [17, 89] mostraram que a interface de rede sem fio (*Wireless Network Interface Card* - WNIC) contribui com cerca de 50% do consumo em um PDA durante a recepção e exibição de *streams* de vídeo.

Neste escopo, o presente capítulo propõe e avalia o uso combinado de duas técnicas de economia de energia em sistemas SWVoD, utilizando o CINAPS como referência. A primeira, denominada *bursty transmission*, proposta anteriormente [17], explora o fato do tempo de comutação da interface WNIC ser significativo. Assim, esse trabalho propôs aumentar o período ocioso contíguo da WNIC entre recepções de pacotes de modo a aumentar a eficácia do uso de modos de baixo consumo de energia (*sleep*) ou mesmo do

desligamento da interface, em uma aplicação de *streaming*. Além disso, a técnica pode ser implementada de maneira simples através de controle de tráfego (*traffic shapping*) no servidor. A segunda, é uma nova técnica introduzida nesta tese, denominada *delayed reassociation*, que se beneficia das características do CINAPS para economizar energia durante o período referente à latência de serviço, descrita no capítulo anterior. Basicamente, essa técnica explora o fato de que no CINAPS usando BERF, o cliente é avisado sobre o instante no qual começará a receber o fluxo de vídeo e em qual dos APs, tal que ele pode entrar em modo de baixo consumo até o momento indicado quando então se reassocia ao AP sinalizado. Além da proposta do uso combinado das duas técnicas no CINAPS, este capítulo avalia também o impacto de cada uma delas, isoladamente ou combinadas, na redução do consumo de energia.

Inicialmente, é apresentado o modelo de consumo de energia do CINAPS, seguido das técnicas de redução do consumo que integram o *Power-aware CINAPS*, versão do sistema consciente do consumo de energia. Após, é apresentada a avaliação experimental do *Power-aware CINAPS*, com diferentes níveis qualitativos de Fator de Paciência, seguida das considerações finais.

5.1 Consumo de Energia no CINAPS

Nesta seção é descrito o modelo de consumo de energia das interfaces de rede sem fio (WNICs) no CINAPS, seguido de um detalhamento das técnicas de redução de consumo introduzidas na solução.

5.1.1 Modelo de Consumo de Energia

Para descrever o consumo de energia das WNICs, faz-se necessário apresentar inicialmente as variáveis principais do modelo simplificado do CINAPS, usando BERF, considerando vídeos CBR de mesma duração e taxa de consumo (o modelo completo pode ser visto nos capítulos anteriores):

Video length (V_{length}). Representa a duração do vídeo em segundos;

Video rate (V_{rate}). Referente a taxa de consumo do vídeo em Mbps;

Arrival rate (λ). Indica a taxa média de chegada de requisições de vídeo por minuto;

Patience Factor (PF). Define o limite máximo em segundos que o cliente está disposto a esperar para ser atendido;

AP throughput ($AP_{throughput}$). Identifica a vazão efetiva de cada AP em Mbps;

AP total (AP_{total}). Representa o número de APs;

Aggregate bandwidth (AB). Reflete a largura de banda agregada em Mbps, sendo esta função de $AP_{throughput}$ e AP_{total} ;

Average latency (AL). Referente a latência média de serviço em segundos experimentada pelos clientes com requisição aceita, sendo esta dependente de todas as variáveis supracitadas.

Além disso, convém definir os modos de operação nos quais a WNIC pode funcionar (o modo de transmissão foi omitido por não ser usado nesta aplicação):

Receive. Modo usado na recepção de pacotes;

Idle. Modo no qual a interface permanece enquanto não está transmitindo ou recebendo pacotes;

Sleep. Modo de baixo consumo de energia;

Off. Modo no qual a interface é desligada completamente.

A relação de potência (P) consumida entre os modos é:

$$P_{receive} > P_{idle} > P_{sleep} > P_{off} \quad (5.1)$$

Conforme dados extraídos da literatura [17] para uma interface Wavelan 2.4 GHz, o consumo aproximado dos modos é: $P_{receive} = 1425$ mW, $P_{idle} = 1319$ mW, $P_{sleep} = 177$ mW e $P_{off} = 0$ mW (valores similares aos apresentados em [22] referentes à WNIC 802.11b Aironet PC4800B com *chipset* Prism). Além disso, o *overhead* de tempo transcorrido durante a transição entre os modos *idle* e *sleep* (T_{switch}) é de 250 μ s.

Com base nas variáveis do modelo do CINAPS e nos modos de operação das WNICs, pode-se dizer que o consumo total de energia é função do tempo em que a WNIC permanece em cada um dos modos e da potência correspondente. Devido às características de VoD¹, sabe-se que o tempo em que a WNIC permanecerá em modo *receive* ($T_{receive}$) é dado por:

¹Através de “*streaming*”, embora explorando o envio de blocos de vídeo em rajadas (*bursts*), limitado à vazão máxima dos APs.

$$T_{receive} = \frac{V_{rate}}{AP_{throughput}} * V_{length} \quad (5.2)$$

Sendo assim, a oportunidade para redução de consumo, considerando o período compreendido entre a requisição do vídeo e a recepção do último bloco de vídeo, se restringe ao tempo restante (T_{idle}), no qual a interface ficaria em modo *idle* caso nenhuma estratégia de redução fosse empreendida, dado por:

$$T_{idle} = V_{length} - T_{receive} \quad (5.3)$$

Considerando o uso do modo *sleep* para economia de energia (neste trabalho não é explorado o desligamento da interface), é necessário computar o *overhead* na transição entre os modos *idle* e *sleep*. Deste modo, o tempo no qual a interface efetivamente permanece em modo *sleep* (T_{sleep}) é dado por:

$$T_{sleep} = T_{idle} - (\beta * V_{length} * T_{switch} * 2) \quad (5.4)$$

onde β é a taxa de *bursty*, que define o número de vezes por segundo que a WNIC chaveia entre os modos *idle* e *sleep*.

Para ilustrar esta questão, pode-se usar como exemplo um cenário onde $V_{rate} = 1$ Mbps e pacotes de 1 KBytes (equivalente a 8 Kbits) enviados de forma intercalada. Como o fluxo de vídeo exige a transmissão de 128 pacotes por segundo, se após cada pacote recebido o cliente chavear para o modo *sleep*, β será igual 128. Ou seja, a cada segundo o *overhead* de transição chega a 6,4 % do tempo total ($128 * T_{switch} * 2$).

Por outro lado, caso não sejam utilizadas estratégias de redução de consumo, o uso da heurística BERF tende a contribuir para o aumento no tempo de atividade da WNIC. Isto se deve ao intervalo compreendido entre a solicitação do vídeo e o estabelecimento do fluxo, o qual surge quando uma requisição é aceita com latência de serviço maior que zero, intervalo no qual a interface fica ociosa aguardando o escalonamento do fluxo.

Em virtude do modelo apresentado, o consumo médio de energia (P_{total}) nas WNICs dos clientes do CINAPS pode ser computado com a seguinte fórmula:

$$P_{total} = P_{BS} + P_{AS} \quad (5.5)$$

Onde P_{BS} (*before scheduled*) é a energia consumida antes de escalonado e P_{AS} (*after scheduled*) é a energia consumida depois de escalonado. Desconsiderando o uso do modo

sleep, $P_{BSnormal}$ é o resultado do produto de AL por P_{idle} e $P_{ASnormal}$ é o resultado da soma do produto de $T_{receive}$ por $P_{receive}$ com o produto de $T_{idle} * P_{idle}$.

Na subseção seguinte ver-se-á o impacto das técnicas de redução na formalização de P_{BS} e P_{AS} .

5.1.2 Técnicas para Redução de Consumo

A versão *Power-aware* do CINAPS adota duas técnicas de redução de consumo de energia: *delayed reassociation* e *bursty transmission*.

A técnica *delayed reassociation* explora o espaço aberto pelo uso da heurística BERF, relacionado ao intervalo compreendido entre a solicitação do vídeo e o estabelecimento do fluxo. Através desta técnica, quando a requisição é aceita com latência de serviço maior que zero, a WNIC é colocada em modo *sleep* e o processo de reassociação ao AP sinalizado pelo WCM é postergado para um momento próximo ao escalonamento do fluxo. Assim, $P_{BSdelayed}$ é calculada com a seguinte fórmula:

$$P_{BSdelayed} = ((AL - (T_{switch} * 2)) * P_{sleep}) + ((T_{switch} * 2) * P_{idle}) \quad (5.6)$$

A técnica *bursty transmission* visa diminuir o *overhead* de transição de modos através do envio de rajadas de pacotes pelo servidor, também chamado de controle de tráfego (*traffic shaping*). O tamanho da rajada depende diretamente da taxa do vídeo, do tamanho do pacote e de β . Retomando o exemplo usado para ilustrar β , pode-se notar que o tamanho da rajada é igual a um pacote para $\beta = 128$. Logo, se β fosse fixado em um, o tamanho da rajada mudaria para 128 pacotes, o que, conforme a Equação 5.4, aumentaria significativamente o tempo em modo *sleep*. Desta forma, com *bursty transmission* a $P_{ASbursty}$ é calculada da seguinte forma:

$$P_{ASbursty} = P_{ASnormal} - ((P_{idle} - P_{sleep}) * T_{sleep}) \quad (5.7)$$

5.1.3 Níveis de Otimização do *Power-aware* CINAPS

Em virtude das técnicas descritas acima, o *Power-aware* CINAPS é capaz de operar com quatro diferentes combinações destas, traduzidas nos seguintes níveis de otimização de consumo:

Nível 0. Nível mais baixo, no qual nenhuma otimização é feita, de modo que $P_{total} =$

$$P_{BSnormal} + P_{ASnormal};$$

Tabela 5.1: Parâmetros da Simulação

Parâmetro	Padrão	Variação
Tempo de Simulação - TS - (s)	3600	N/A
Número de APs - AP_{total} - (un.)	16	1-16
Vazão dos APs - $AP_{throughput}$ - (Mbps)	30	N/A
Duração dos Vídeos - V_{length} - (s)	1200	60-1200
Taxa dos Vídeos - V_{rate} - (Mbps)	1	N/A
Número de Vídeos - V_{total} - (un.)	100	N/A
Taxa de Chegada - λ - (req/min)	60	1-60

Nível 1. Nível onde é empregada apenas a técnica *delayed reassociation*, de modo que

$$P_{total} = P_{BS_{delayed}} + P_{AS_{normal}};$$

Nível 2. Nível que adota apenas a técnica *bursty transmission*, de modo que $P_{total} =$

$$P_{BS_{normal}} + P_{AS_{bursty}};$$

Nível 3. Nível mais alto, no qual as duas técnicas são empregadas em conjunto, de modo

$$\text{que } P_{total} = P_{BS_{delayed}} + P_{AS_{bursty}}.$$

5.2 Análise Experimental

Nesta seção é apresentada a análise de desempenho das otimizações de consumo de energia do CINAPS (considerando o mesmo cenário e premissas do Capítulo 3). Inicialmente, são mostrados experimentos base, seguidos dos resultados obtidos para os quatro níveis usando diferentes taxas de *bursty* (β).

5.2.1 Experimentos Base

Esta subseção apresenta os resultados de desempenho do CINAPS coletados dentro do contexto exposto acima. Todas as figuras indicam as médias aritméticas com intervalo de confiança de 95% (representado nos gráficos através de barras de erros) calculadas a partir de dez iterações usando diferentes sementes para diferentes combinações dos parâmetros relacionados na Tabela 5.1 (lembrando que enquanto um parâmetro é variado por curva, os demais são fixados nos seus valores máximos), variando também o Fator de Paciência dos clientes de acordo com as seguintes categorias qualitativas:

Pouco paciente. Cliente aceita uma latência de serviço equivalente a 10% da duração do vídeo ($V_{length}/10$);

Paciente. Cliente aceita uma latência de serviço equivalente a 25% da duração do vídeo ($V_{length}/4$);

Muito paciente. Cliente aceita uma latência de serviço equivalente a 50% da duração do vídeo ($V_{length}/2$);

Note que, assim como nos capítulos anteriores, para facilitar a análise, este trabalho se restringe a vídeos de mesma duração e taxa, variando entre um e vinte minutos, os quais imagina-se que serão mais populares em ambientes com dispositivos móveis.

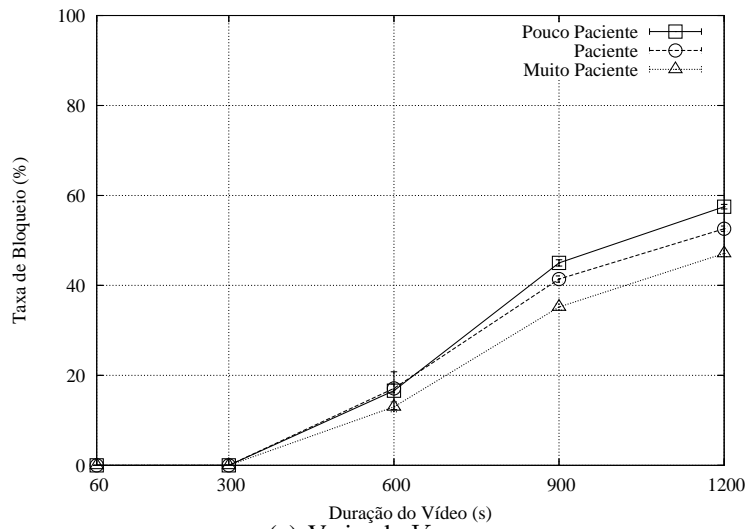
As Figuras 5.1 e 5.2 ilustram o desempenho do CINAPS usando a heurística BERF. Em particular, resumem a influência das principais variáveis do modelo no percentual de requisições bloqueadas e na latência média de serviço (no Capítulo 3 é apresentada uma análise detalhada do impacto das variáveis no desempenho). Cabe ressaltar que a latência média de serviço tende a se aproximar do Fator de Paciência nos casos onde a taxa de bloqueio é maior que zero, o que, para vídeos longos, ocorre tanto para 1 como para 16 APs. Conforme descrito anteriormente, esta métrica impacta diretamente o consumo de energia, como será mostrado a frente.

5.2.2 Resultados de Consumo de Energia

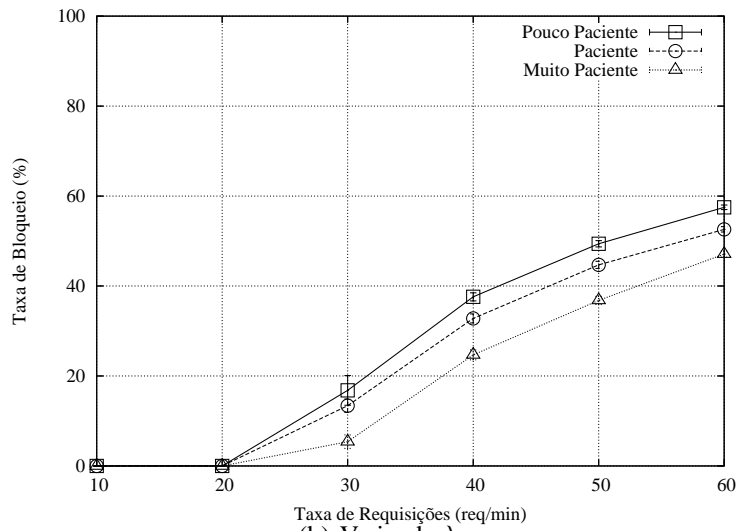
Nesta subseção é analisado o consumo médio de energia (P_{total}), medido em Joules, tomando como base os resultados obtidos com a categoria “Clientes Pacientes”, isto é, com Fator de Paciência igual a um quarto da duração do vídeo, usando o número máximo de APs.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam o impacto da duração do vídeo (V_{length}) e da taxa de requisições (λ), respectivamente, no consumo de energia nos quatro níveis de otimização, utilizando três taxas de *bursty* (β): 1, 64 e 128.

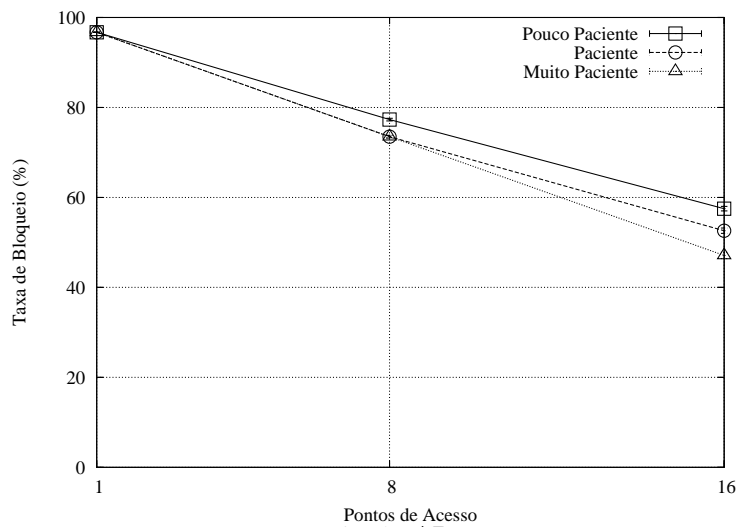
Na Figura 5.3 pode-se verificar que, para $V_{length} \leq 300$ segundos, não existe a necessidade de aceitar requisições para uso futuro de canais pois sempre existem recursos para atendê-las imediatamente. No entanto, para $V_{length} \geq 600$, passam a ocorrer períodos de ocupação total da largura de banda agregada, obrigando o WCM a aceitar requisições com latência de serviço variando entre zero e o valor do Fator de Paciência (PF). Já que o PF é igual a $1/4$ de V_{length} , este cresce linearmente com a duração dos vídeos, o



(a) Variando V_{length}

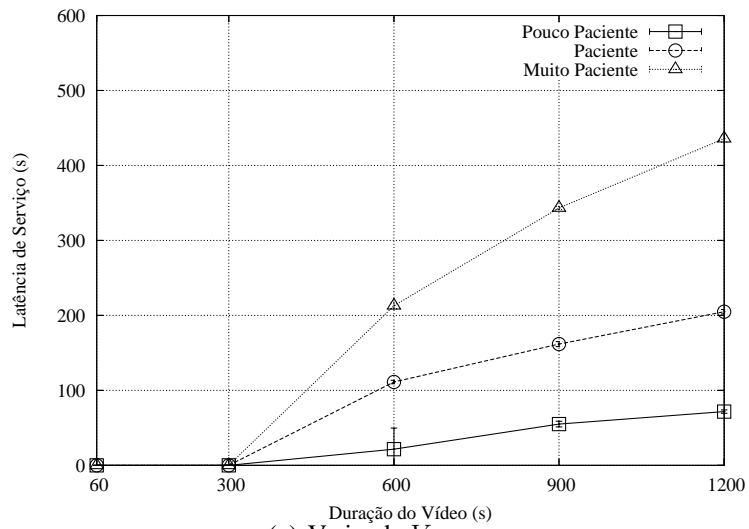


(b) Variando λ

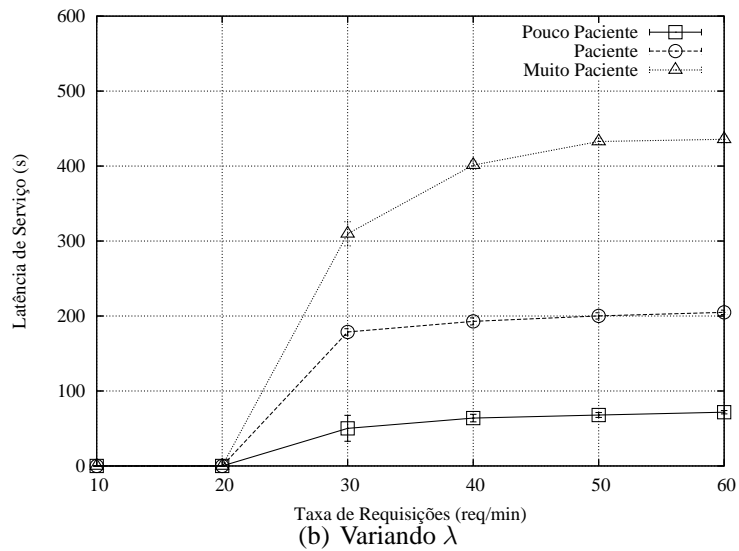


(c) Variando AP_{total}

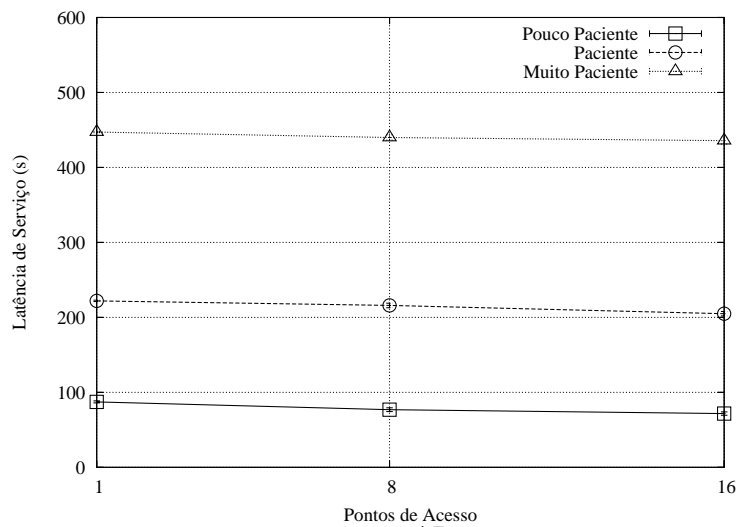
Figura 5.1: Influência do Fator de Paciência na taxa de bloqueio de acordo com a duração do vídeo (V_{length}), taxa de requisições (λ) e número de pontos de acesso (AP_{total})



(a) Variando V_{length}



(b) Variando λ



(c) Variando AP_{total}

Figura 5.2: Influência do Fator de Paciência na latência média de serviço de acordo com a duração do vídeo (V_{length}), taxa de requisições (λ) e número de pontos de acesso (AP_{total})

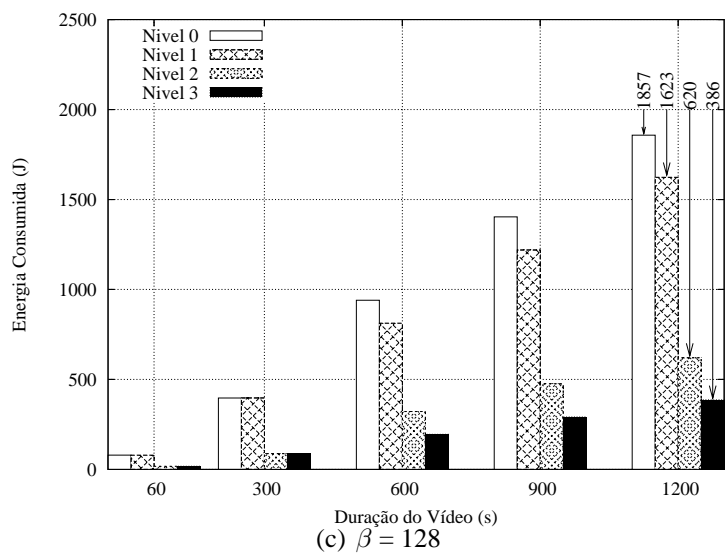
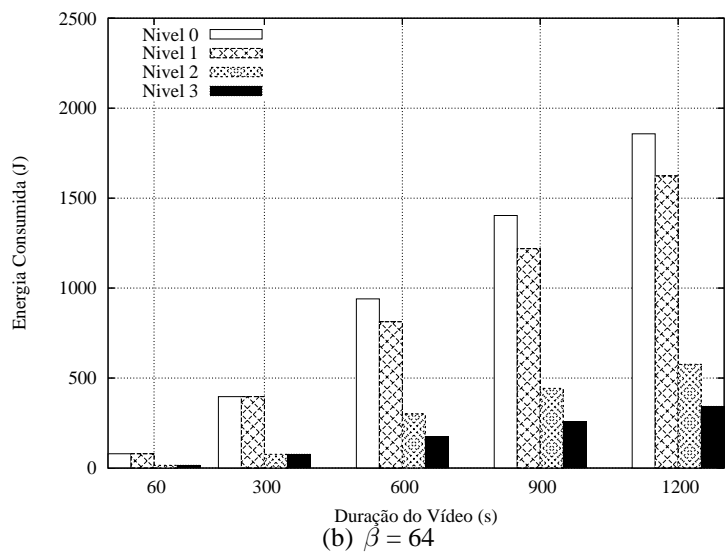
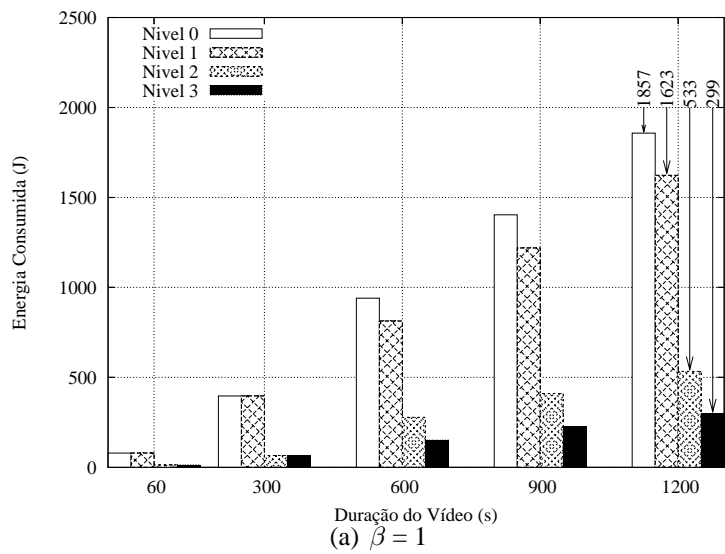
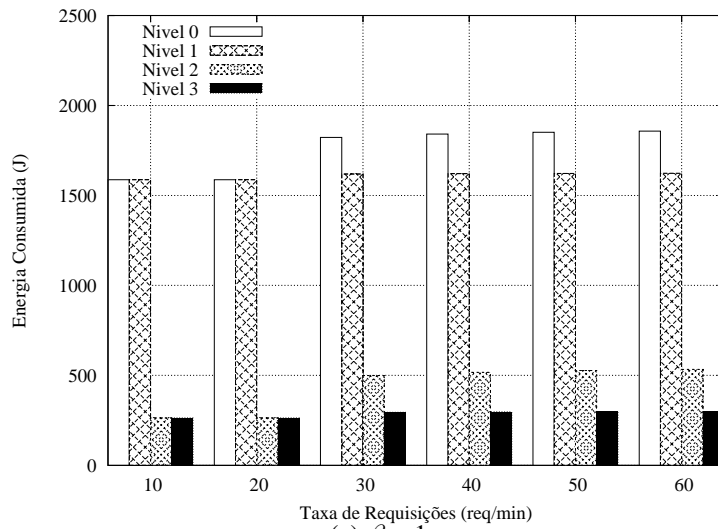
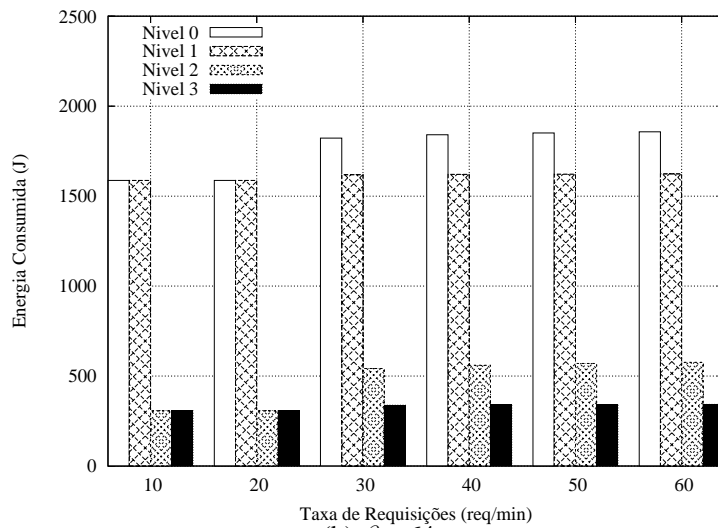


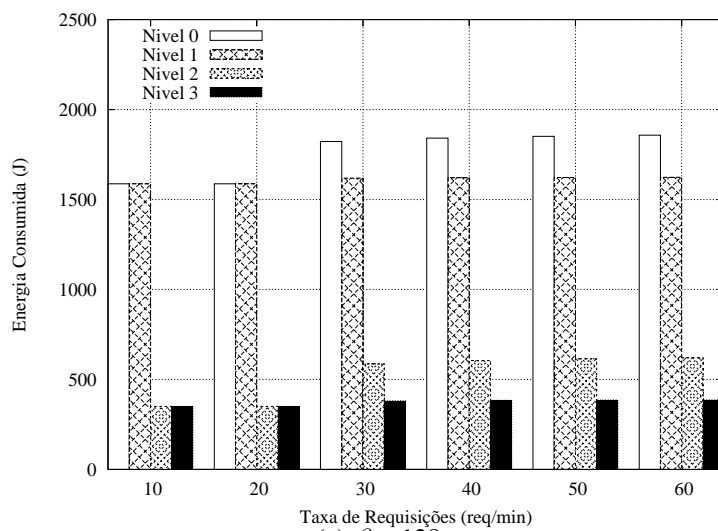
Figura 5.3: Influência da duração do vídeo (V_{length}) e da taxa de *bursty* (β) no consumo médio de energia (P_{total})



(a) $\beta = 1$



(b) $\beta = 64$



(c) $\beta = 128$

Figura 5.4: Influência da taxa de requisições (λ) e da taxa de *bursty* (β) no consumo médio de energia (P_{total})

que implica também no crescimento da oportunidade para aceitação de requisições em momentos de escassez de largura de banda. Isto explica o motivo pelo qual o impacto da técnica *delayed reassociation* aumenta conforme a duração do vídeo.

Na Figura 5.4 observa-se que λ influencia nos Níveis 0 e 2 de otimização, ou seja, aqueles que são afetados pelo aumento no tempo *idle* causado pela exploração do *PF*. Excluindo as taxas onde a largura de banda agregada é suficiente para atender imediatamente as requisições ($\lambda \leq 20$), este comportamento ocorre porque conforme aumenta λ , aumenta o percentual de requisições atendidas com latência de serviço maior que zero (69,5% para $\lambda = 30$ e 72,1% para $\lambda = 60$), muitas vezes com valor próximo ao do *PF*.

Como mostrado anteriormente no exemplo utilizado para ilustrar β , pode-se verificar uma redução próxima a 4,7% no consumo de energia (em relação ao verificado com o nível 0) quando o seu valor foi diminuído de 128 (onde não ocorre envio de rajadas) para 1 (maior rajada possível considerando uma latência máxima de um segundo). Isto ocorre porque a técnica *bursty transmission* tem como objetivo diminuir o *overhead* de transição de modos, o qual responde por cerca de 6,4% do consumo no nível 0. Quando ocorrem poucas transições (por exemplo, uma por segundo no caso de β igual a um), este *overhead* deixa de ser significativo e a energia consumida se aproxima do valor mínimo que pode ser atingido explorando o modo *sleep*. Uma alternativa a considerar seria o uso do modo *off*, onde o limite mínimo passaria a ser o gasto no modo *receive*, mas esta está fora do escopo deste trabalho.

Analisando o caso onde as otimizações são mais efetivas (todos os parâmetros em seus valores máximos), nota-se pelos valores indicados nas Figuras 5.3(a) e 5.3(c) que a técnica *delayed reassociation* proporciona uma redução de até 12,6% no consumo de energia (Nível 1), enquanto que *bursty transmission* possibilita uma diminuição de 66,6% com $\beta = 128$ e 71,3% com $\beta = 1$ (Nível 2). Assim sendo, aplicando-as em conjunto (Nível 3), obteve-se uma redução total de aproximadamente 84% com $\beta = 1$.

5.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado um estudo sobre consumo de energia na versão *Power-aware* do CINAPS (*Cluster of INexpensive Access PointS*), um sistema VoD escalável para dispositivos móveis baseado na utilização de pontos de acesso 802.11 co-localizados. Nesta versão, o sistema original do CINAPS foi estendido para prover suporte às técnicas de redução de consumo de energia das interfaces de rede dos dispositivos (WNIC),

denominadas *delayed reassociation* e *bursty transmission*. Na avaliação de desempenho, realizada utilizando-se a heurística de controle de associação BERF, que permite alocação futura de canais para atender requisições de vídeo em momentos de escassez de recursos, constatou-se que o nível mais alto de otimização de energia, referente a combinação das duas técnicas introduzidas, foi capaz de diminuir significativamente o consumo médio de energia da WNIC, chegando próximo a 84% de redução em relação ao nível sem otimizações.

Em resumo, as principais contribuições deste capítulo são:

1. Modelagem do consumo de energia no CINAPS usando a heurística BERF de controle de associação;
2. Proposta do *Power-aware* CINAPS – versão do CINAPS incorporando as técnicas de redução de consumo de energia *bursty transmission* e *delayed reassociation*, esta última proposta nesta tese;
3. Avaliação do impacto das combinações das técnicas no consumo de energia médio por dispositivo no *Power-aware* CINAPS.

No próximo capítulo, o modelo base do CINAPS é estendido, incorporando o efeito da distância entre clientes e APs, o qual impacta diretamente o comportamento dos diferentes modos de transmissão do 802.11a/g e, conseqüentemente, a dinâmica de sistemas SWVoD.

Capítulo 6

Sistema Consciente da Distância

Embora os resultados apresentados nos capítulos anteriores sejam promissores, eles assumiam, com o intuito de simplificar a análise, que todos os clientes estavam distribuídos aleatoriamente pela área de cobertura do *cluster* de APs, desconsiderando o impacto da distância. Ou seja, assumiu-se que a vazão dos APs não dependia desta variável. No entanto, diversos trabalhos [27, 55] demonstraram que esta variável impacta significativamente a vazão. Isto se deve ao fato dos padrões 802.11 a/g utilizarem diferentes modos de transmissão, caracterizados por adotarem diversos esquemas de modulação e correção de erros, os quais são mais ou menos eficientes de acordo com a relação sinal/ruído obtida, onde o fator principal que afeta esta relação é a distância entre o transmissor e o receptor.

Para cada modo de transmissão, tem-se na prática uma vazão efetiva máxima diferente. Em via de regra, quanto maior a distância, menor é a vazão efetiva. Entretanto, na prática, a queda da vazão efetiva ocorre em degraus, isto é, não ocorre linearmente com o aumento da distância, de modo que certos limiares de alcance/vazão podem ser estabelecidos. Além disso, outro problema decorre da anomalia causada por clientes operando a diferentes distâncias do AP [28]. Neste contexto, um cliente posicionado longe do AP (utilizando um modo de transmissão com menor vazão efetiva) faz com que a vazão efetiva dos outros clientes que compartilham o mesmo canal, mesmo que estejam próximos ao AP (e por isso usando um modo de transmissão teoricamente capaz de atingir maior vazão), seja reduzida em função do uso do canal (ocupado por mais tempo para transmitir uma mesma quantidade de dados) pelo cliente mais distante.

Do ponto de vista do sistema CINAPS, e da aplicação para qual ele foi concebido, um dos principais objetivos é a diminuição da taxa de bloqueio de requisições de *streams* de vídeo (percentual de requisições que não são aceitas pelo sistema), que é fortemente influenciada pela vazão agregada dos APs. Com base nas considerações do parágrafo

anterior, nota-se que uma maneira simples de gerenciar a vazão agregada é alterar o controle de associação de modo a levar em conta os degraus de distância, ou seja, os alcances (*ALC*) dos modos de maior vazão efetiva, aceitando apenas a associação de clientes dentro de um destes patamares. Esta estratégia simplifica o gerenciamento dos canais, permitindo a atribuição de um valor bem definido de vazão, além de evitar a necessidade de tratar o problema da anomalia decorrente do uso simultâneo de diferentes modos de transmissão. Por outro lado, a intuição aponta para o pensamento de que a eficiência desta estratégia sempre dependerá do posicionamento dos clientes em relação ao *cluster* de APs, já que apenas os clientes localizados dentro da área de cobertura absoluta do *cluster* de APs co-localizados (dada por *ALC*) serão atendidos. Embora este novo parâmetro introduzido no mecanismo de aceitação de requisições seja importante, este não é o único. Como mostrado nos capítulos anteriores, outros fatores afetam diretamente a taxa de bloqueio: taxa de requisições, duração dos vídeos, número de APs e Fator de Paciência (*Patient Factor - PF*). Dependendo destes fatores, a introdução da distância como critério pode representar um falso impacto no desempenho do sistema, ou seja, este pode ficar mascarado pelos demais fatores.

Este capítulo objetiva avaliar, no contexto do CINAPS, o real impacto da relação alcance/vazão efetiva proporcionada por diferentes modos de transmissão do padrão 802.11a, em ambientes com diferentes tamanhos de área. Apesar do padrão 802.11a estabelecer oito modos de transmissão, são focados neste estudo os três modos mais efetivos [55] – Modo 8 (64-QAM), Modo 6 (16-QAM) e Modo 4 (QPSK) – que usam $FEC=3/4$ e apresentam taxa nominal de 54 Mbps, 36 Mbps e 18 Mbps, respectivamente. Para tanto, uma nova heurística consciente da distância – DBERF (*Distance-aware BERF*) – é proposta e avaliada nas próximas seções, inclusive considerando o potencial de abordagens adaptativas de escolha do modo de transmissão.

6.1 Heurística Consciente da Distância

A heurística DBERF (*Distance-aware BERF*) baseia-se na heurística BERF proposta anteriormente. BERF prioriza a escolha do AP que terá largura de banda liberada mais cedo, beneficiando-se da tolerância a latência de serviço de aplicações de VoD que permite criar um procedimento de associação preguiçosa de clientes aos APs em períodos nos quais os canais ficam completamente ocupados. Quando isto acontece, as requisições dos clientes são enfileiradas e atendidas em um tempo futuro quando a largura de banda requerida

se tornar disponível, desde que a latência não exceda o PF . A questão chave para esta heurística é que, devido ao comportamento regular da aplicação, o tempo no qual passará a existir largura de banda suficiente é facilmente previsto pelo sistema. Em particular, esta característica permite informar ao cliente, no momento da requisição, a latência de serviço a qual estará submetido.

A diferença entre a nova heurística DBERF e a antiga BERF resume-se na introdução de uma nova regra de admissão. Mais precisamente, DBERF considera a distância do cliente até o *cluster* de APs. Caso esta distância seja maior do que o limiar de alcance (ALC) determinado pelo modo de transmissão adotado, a requisição será negada. DBERF assume que o WCM é capaz de inferir a distância, através de técnicas baseadas em RSSI [45], ou através de informações de posição enviadas pelo cliente com base em um GPS, por exemplo.

6.2 Análise Experimental

Esta seção apresenta a avaliação experimental realizada para mensurar o impacto da relação alcance/vazão efetiva proporcionada por diferentes modos de transmissão do padrão 802.11a no desempenho do *Distance-aware* CINAPS. Na primeira subseção, são expostos os detalhes pertinentes sobre a extensão implementada na ferramenta TCHE (apresentada no Apêndice A) para viabilizar as simulações envolvendo área de cobertura. A seguir, a segunda subseção descreve o cenário adotado, traduzido nos parâmetros de entrada da ferramenta, e a métrica adotada na avaliação: taxa de bloqueio. Na terceira subseção, são mostrados os resultados obtidos para um caso hipotético, desconsiderando o alcance, onde o desempenho é o ideal, com o intuito de servir como base de comparação para as análises posteriores. Ainda nesta subseção, são expostos os resultados efetivos alcançados com a nova heurística DBERF para os três modos de transmissão do 802.11a que atingem maior vazão, seguidos da comparação de desempenho de uma abordagem adaptativa de escolha de modo de transmissão com os resultados ideais e com os estáticos. Por fim, a última subseção discute possíveis estratégias para aproximar o desempenho obtido do ideal.

6.2.1 Extensão para Simulação de Área de Cobertura

Na extensão implementada, a posição de um cliente que efetua a requisição é definida através de probabilidade. Para tanto, é gerado um número aleatório entre 0 e 1. Se o

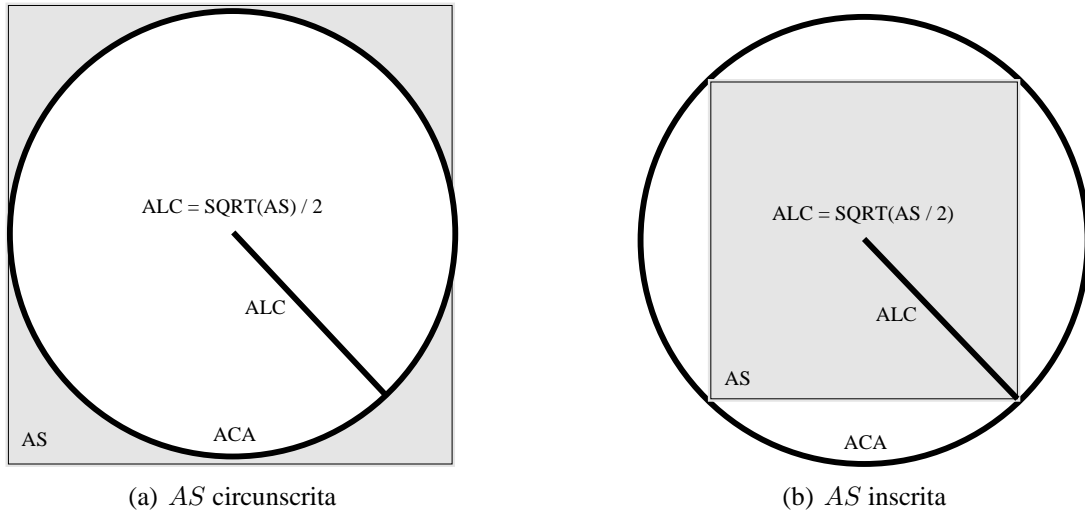


Figura 6.1: Casos particulares da relação AS x ACA .

número for maior que o Coeficiente de Área Coberta (CAC), o cliente é considerado fora da área de cobertura. Caso contrário, está teoricamente apto a ser atendido, dependendo da heurística de controle de associação. O procedimento usado no cálculo de CAC é descrito a seguir, em conjunto com a definição do Coeficiente de Área Descoberta (CAD).

6.2.1.1 Cálculo de CAC e CAD

O Coeficiente de Área Coberta (CAC) expressa o percentual de AS que faz parte da Área de Cobertura Absoluta (ACA), sendo calculado em função das variáveis abaixo.

O alcance (ALC) efetivo de transmissão dos APs define a ACA que estes podem atender com uma determinada vazão efetiva máxima (influenciada diretamente pelo modo de transmissão adotado). Por simplicidade, ACA é geralmente calculada como sendo a área de uma circunferência onde o raio (r) é igual a ALC , dada pela Equação 6.1:

$$ACA = \pi r^2 = \pi ALC^2 \quad (6.1)$$

Por outro lado, a Área de Simulação (AS) é modelada, de forma simplificada, como um quadrado de lado (l), de modo que AS é definida pela Equação 6.2:

$$AS = l^2 \quad (6.2)$$

Considerando que o *cluster* de APs está posicionado exatamente no centro de AS , pode-se definir a Área de Cobertura Relativa (ACR), isto é, a parte da Área de Simulação que é efetivamente atendida pelos APs , como sendo a intersecção entre ACA e AS .

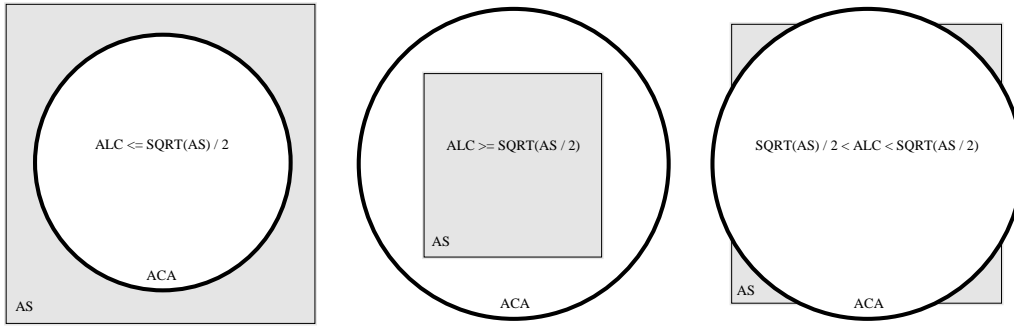


Figura 6.2: Condições especiais de cálculo de ACR .

Existem dois casos particulares que definem a computação de ACR (Figura 6.1): AS circunscrita a ACA e AS inscrita em ACA . O primeiro caso (ALC_{circ}) ocorre quando ALC é igual a $\sqrt{AS}/2$, enquanto o segundo (ALC_{insc}) acontece quando ALC é igual a $\sqrt{AS}/2$. Em decorrência destes casos particulares, surgem três possíveis condições (Figura 6.2):

$ALC \leq ALC_{circ}$: Neste caso, ACR é igual a ACA ;

$ALC \geq ALC_{insc}$: Toda área é atendida, portanto ACR é igual a AS ;

$ALC_{circ} < ALC < ALC_{insc}$: Caso especial onde é necessário aplicar funções trigonométricas (cálculo de área de setor circular e de triângulos retângulos) para computar ACR , conforme a Equação 6.3.

$$ACR = \left(\left(90 - 2 * \cos\left(\frac{\sqrt{AS}}{2 * ALC}\right) \right) * \pi * ALC^2 \right) + \left(\sqrt{AS} * \sqrt{4 * ALC^2 - AS} \right) \quad (6.3)$$

Isto posto, pode-se definir CAC através da Equação 6.4.

$$CAC = \frac{ACR}{AS} \quad (6.4)$$

Por outro lado, o Coeficiente de Área Descoberta (CAD) aponta o percentual de AS que não faz parte da Área de Cobertura Absoluta (ACA), sendo calculado em função de CAC , conforme a Equação 6.5.

$$CAD = 1 - CAC \quad (6.5)$$

Tabela 6.1: Combinações de *AS* e *ALC* investigadas

<i>AS</i>	<i>ALC</i>	<i>CAC</i>	<i>CAD</i>
50x50 m ²	30 m	0,951	0,049
	60 m	1,000	0,000
	100 m	1,000	0,000
100x100 m ²	30 m	0,283	0,717
	60 m	0,951	0,049
	100 m	1,000	0,000
150x150 m ²	30 m	0,126	0,874
	60 m	0,503	0,497
	100 m	0,993	0,007
200x200 m ²	30 m	0,071	0,929
	60 m	0,283	0,717
	100 m	0,785	0,215

6.2.2 Cenário de Simulação

Nesta análise, considera-se um cenário similar ao descrito nos capítulos anteriores. A principal diferença está no fato de que neste caso, é assumido que os clientes possuem dispositivos móveis com interface 802.11a e estão distribuídos uniformemente por uma determinada área, com tamanho que varia entre 50x50 e 200x200 m². Além disso, a premissa contida no Capítulo 3 que assumia, de forma simplificada, que todos os clientes estavam na área de cobertura do *cluster* de APs, é relaxada. Ou seja, passa a existir uma determinada probabilidade de um cliente estar na área de cobertura, função do tamanho da área de simulação e do alcance do modo de transmissão usado nos APs.

Por simplicidade, o presente trabalho se restringe a quatro tamanhos de área de simulação (*AS*), estudados para os três modos de transmissão do 802.11a que atingem maior vazão efetiva – Modos 8, 6 e 4 (ilustrados na Figura 2.5) – cujas relações alcance (*ALC*) / vazão efetiva máxima são, respectivamente, 30 m / 21 Mbps, 60 m / 16 Mbps e 100 m / 10 Mbps, conforme reportado em [55]. A Tabela 6.1 apresenta os Coeficientes de Área Coberta (*CAC*) e Descoberta (*CAD*) para as diferentes combinações de *AS* e *ALC* investigadas. As análises concentram-se em vídeos com taxa de 1 Mbps¹ na configuração com maior largura de banda agregada, atingida com doze pontos de acesso co-localizados,

¹Por exemplo, esta taxa é compatível com a capacidade de um Ipod [11] que suporta vídeos H.264 com 750 Kbps em resolução de 320x240 *pixels* e 30 quadros/s combinado com áudio de 128 Kbps.

Tabela 6.2: Parâmetros da Simulação

Parâmetro	Padrão	Variação
Tempo de Simulação - TS - (s)	3600	N/A
Taxa dos Vídeos - V_{rate} - (Mbps)	1	N/A
Número de Vídeos - V_{total} - (unidades)	100	N/A
Duração dos Vídeos - V_{length} - (s)	1200	300-1200
Número de APs - AP_{total} - (unidades)	12	1, 4, 8, 12
Vazão dos APs - $AP_{throughput}$ - (Mbps)	21	10, 16, 21
Taxa de Chegada - λ - (requisições/min)	60	10-120
Fator de Paciência - PF - (s)	$\frac{V_{length}}{2}$	150-600

e a vídeos de mesma duração, variando entre cinco e vinte minutos. Em relação ao fator de paciência, são utilizados valores proporcionais aos valores de latência média obtidos com os esquemas básicos de *broadcast* periódico considerados até recentemente como o estado-da-arte para sistemas VoD escaláveis (como visto no Capítulo 2). A Tabela 6.2 sumariza os principais parâmetros de simulação.

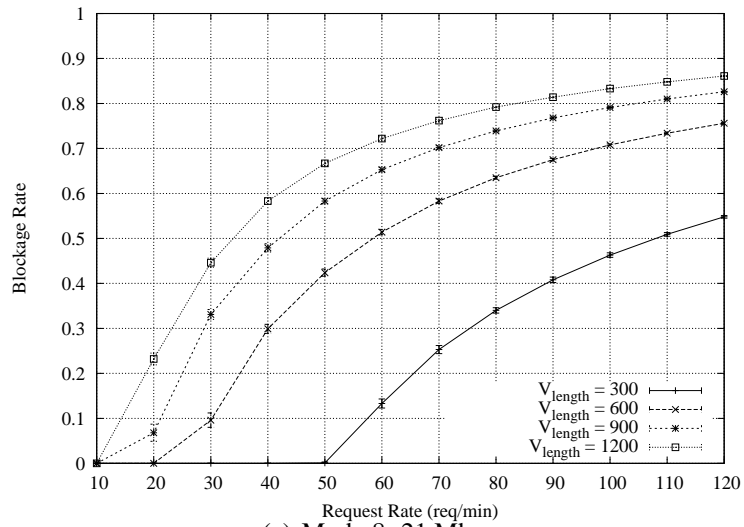
Para avaliar o desempenho do sistema consciente da distância para estas combinações de parâmetros, este trabalho adota como métrica principal a Taxa de Bloqueio (*Blockage Rate* - BR), explicada no Seção 3.3.

6.2.3 Avaliação de Desempenho

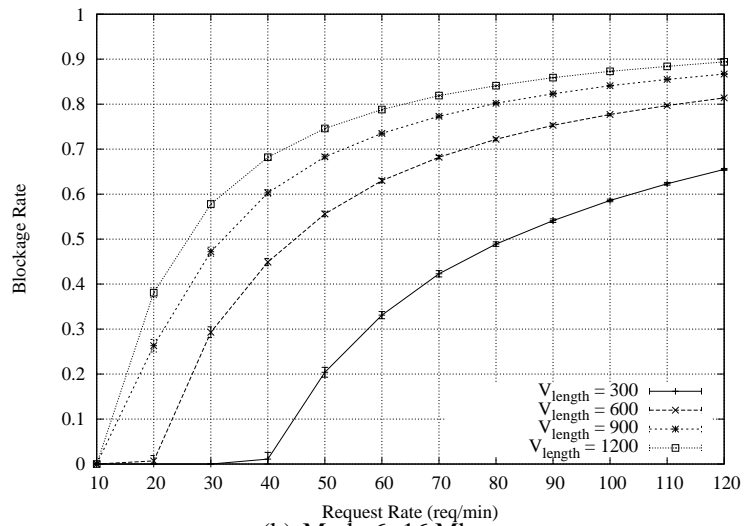
Esta subseção apresenta os resultados de desempenho do CINAPS coletados dentro do contexto exposto acima. Todas as figuras indicam as médias aritméticas com intervalos de confiança de 95% (representados nos gráficos através de barras de erros) calculadas a partir de dez iterações usando diferentes sementes para diferentes combinações dos parâmetros relacionados nas Tabelas 6.1 e 6.2.

6.2.3.1 Taxa de Bloqueio Ideal

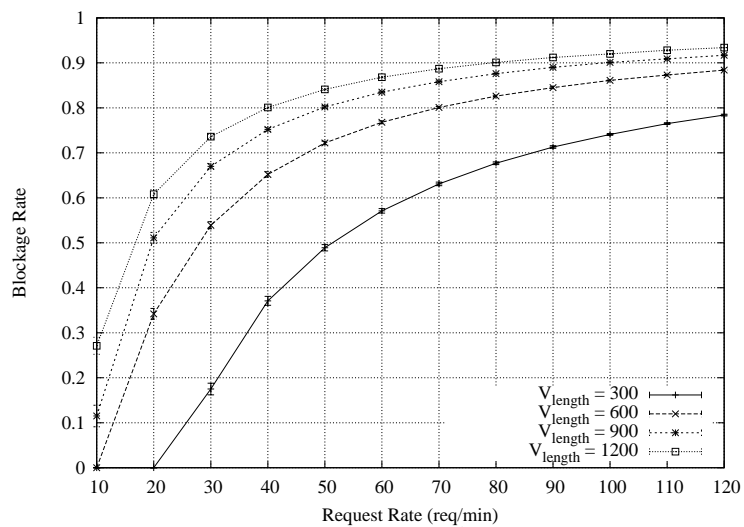
Para servir como base de comparação à avaliação da correlação entre a vazão dos APs e o alcance, foram realizados experimentos hipotéticos desconsiderando o fator alcance. Neste caso (heurística BERF), considera-se que todos os clientes que requisitam vídeos estão dentro da área de cobertura dos APs co-localizados, isto é, $ACR = AS$. A Figura 6.3 apresenta os resultados obtidos, resumindo a influência das principais variáveis do modelo na taxa de bloqueio (nos Capítulos 3 e 4 estão contidas análises detalhadas do impacto



(a) Modo 8: 21 Mbps



(b) Modo 6: 16 Mbps



(c) Modo 4: 10 Mbps

Figura 6.3: Taxa de bloqueio ideal, obtida com a heurística BERF que desconsidera o alcance, para os três modos de transmissão, usando 12 APs e diferentes V_{length} e λ .

das variáveis no desempenho). Note que estes resultados são especialmente interessantes por representarem os limites máximos de desempenho que podem ser obtidos através de um sistema baseado em APs 802.11a (considerando-se o limite de doze canais não sobrepostos adotado em [55]) com definição estática de modo de transmissão, esteja este adotando APs posicionados de maneira centralizada (*cluster* de APs co-localizados) ou distribuídos pela área de simulação de uma forma que maximize a cobertura.

6.2.3.2 Taxa de Bloqueio Efetiva

Os resultados da Figura 6.4 refletem o desempenho da heurística DBERF, proposta neste trabalho, onde os clientes que estão posicionados além do limiar de alcance (*ALC*) têm as suas requisições negadas imediatamente pelo *WCM*, de acordo com a definição estática de modo de transmissão.

Quando comparado o desempenho ideal de um determinado modo de transmissão (Figura 6.3) com o desempenho obtido pela heurística DBERF para o mesmo modo, nota-se que a taxa de bloqueio efetiva é alterada significativamente apenas nos casos em que a taxa de bloqueio ideal (determinada pelas demais variáveis do sistema) está abaixo do Coeficiente de Área Descoberta (*CAD*), apresentado na Tabela 6.1. Portanto, os resultados comprovam que, para uma distribuição uniforme de clientes pela área de simulação, o impacto do alcance fica limitado ao *CAD*.

A seguir, é abordado o potencial de uso de um esquema adaptativo para diminuir a taxa de bloqueio. Para comparação, são utilizados os resultados expostos na Figura 6.3(a), obtidos com o modo de transmissão de maior vazão (Modo 8), como referência de taxa de bloqueio ideal.

6.2.3.3 Abordagem Adaptativa

As Figuras 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8 ilustram o desempenho obtido pelos três modos de transmissão para os quatro tamanhos de área simulados e vídeos com duração de 300, 600, 900 e 1200 s, respectivamente. Em virtude do modo de transmissão mais efetivo variar conforme a combinação das variáveis do sistema, os resultados obtidos com base em uma abordagem adaptativa, capaz de utilizar o modo de transmissão mais eficiente para cada combinação, mostram que ela consegue diminuir levemente a taxa de bloqueio, aproximando-a dos seus valores ideais. A Tabela 6.3 mostra a taxa de bloqueio média obtida com os três modos de transmissão estudados, comparadas a obtida com a abordagem adaptativa e aos valores ideais. As médias englobam as doze taxas de requisições,

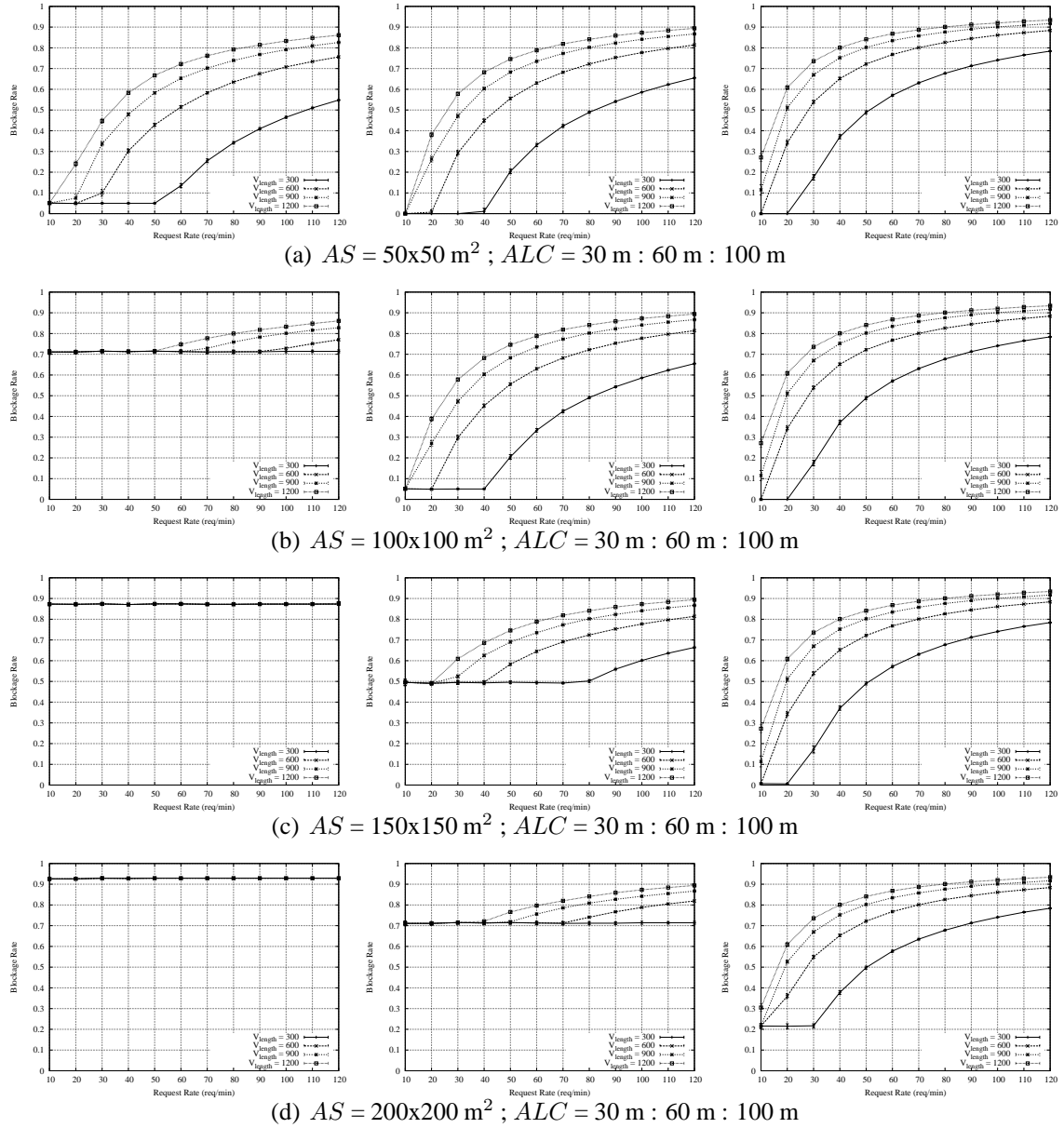


Figura 6.4: Impacto de V_{length} e λ na taxa de bloqueio obtida por DBERF, com diferentes áreas de simulação e alcances, em um *cluster* de 12 APs

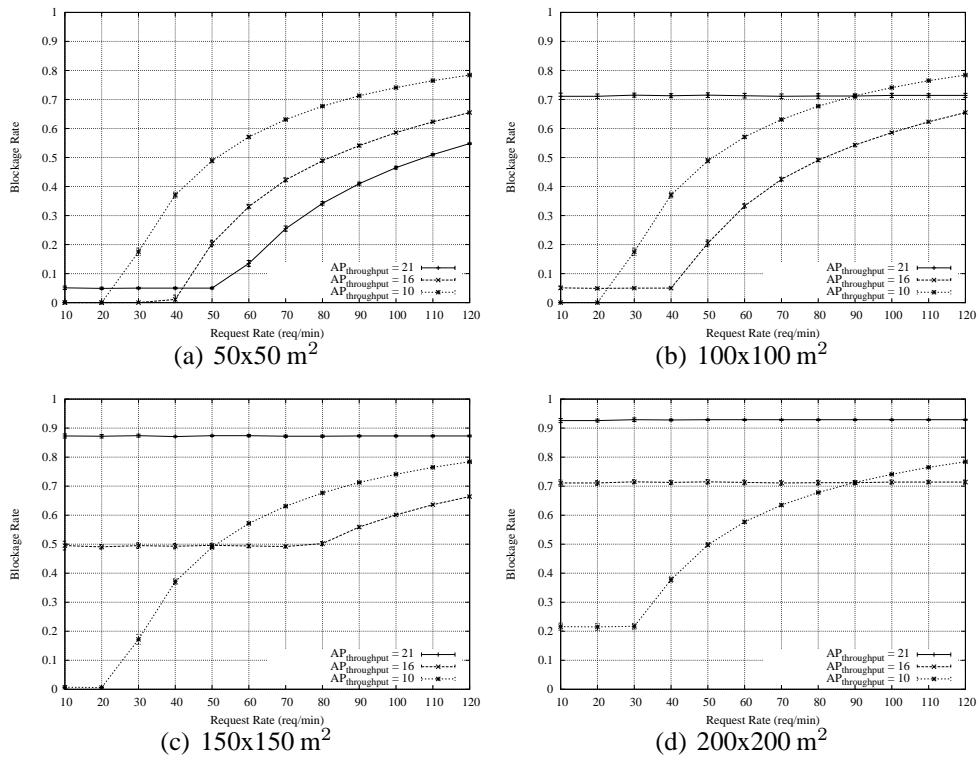


Figura 6.5: Influência dos modos de transmissão na taxa de bloqueio para as quatro áreas de simulação, em um *cluster* de 12 APs e $V_{length} = 300$ s

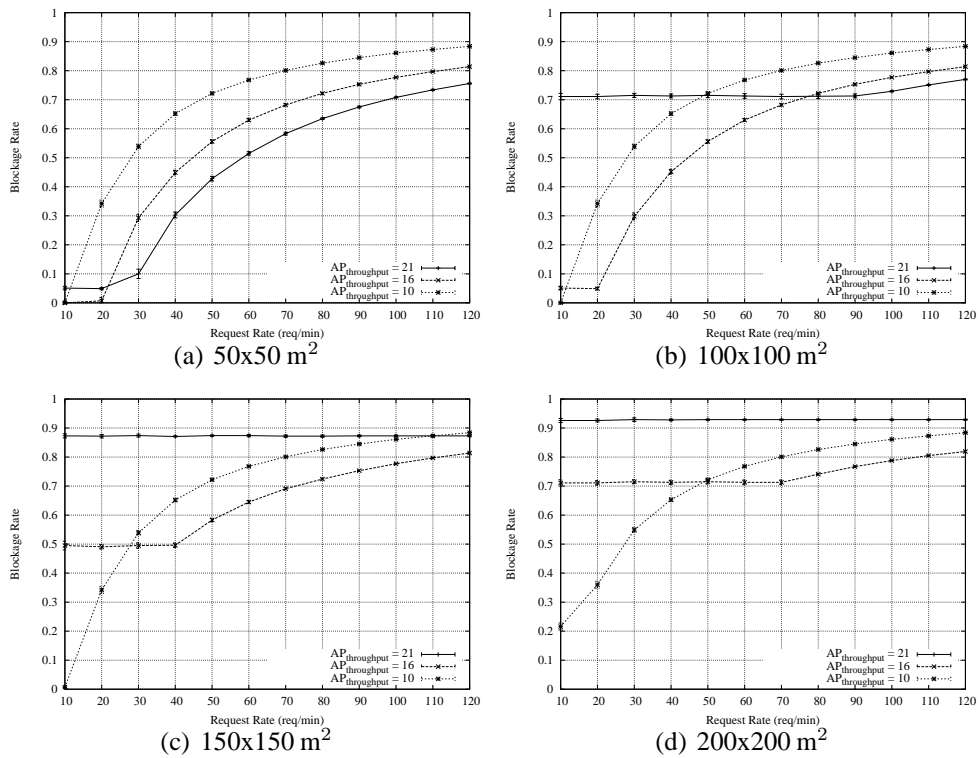


Figura 6.6: Influência dos modos de transmissão na taxa de bloqueio para as quatro áreas de simulação, em um *cluster* de 12 APs e $V_{length} = 600$ s

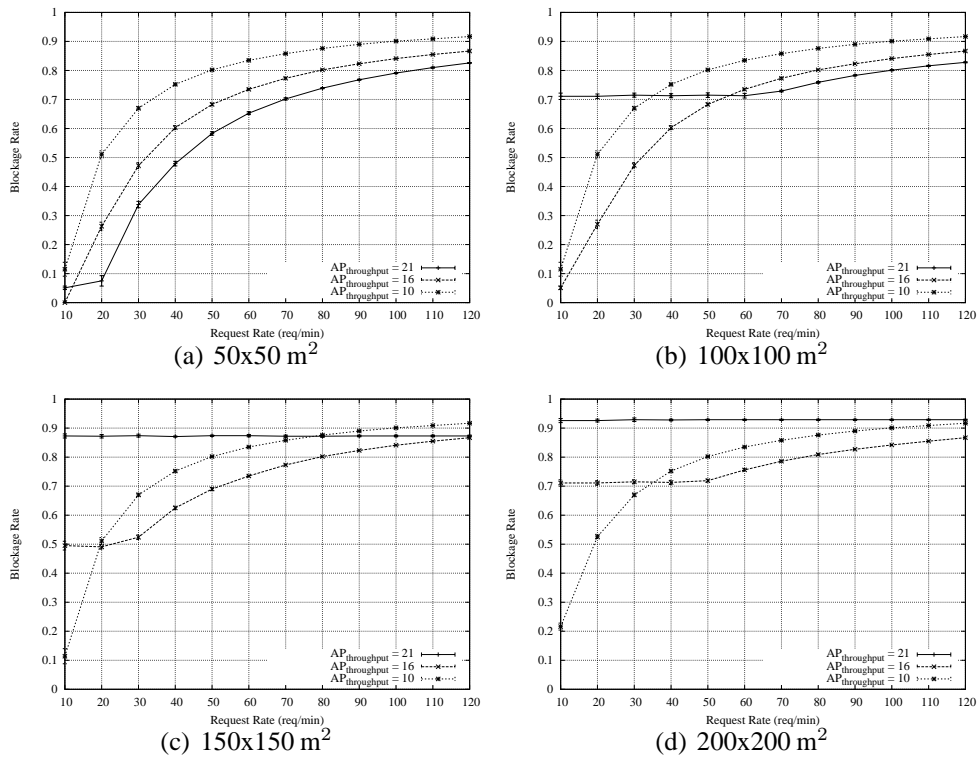


Figura 6.7: Influência dos modos de transmissão na taxa de bloqueio para as quatro áreas de simulação, em um *cluster* de 12 APs e $V_{length} = 900$ s

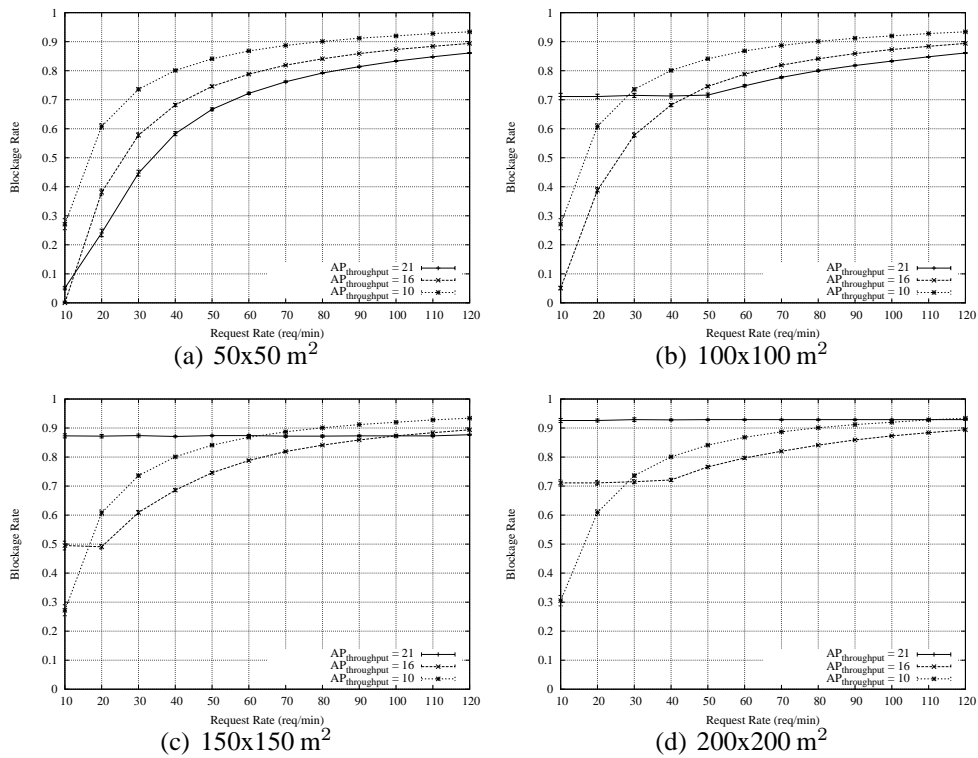


Figura 6.8: Influência dos modos de transmissão na taxa de bloqueio para as quatro áreas de simulação, em um *cluster* de 12 APs e $V_{length} = 1200$ s

Tabela 6.3: Taxa de bloqueio média (*ABR*)

<i>AS</i>	<i>ALC</i>	<i>V_{length}</i>				
		300 s	600 s	900 s	1200 s	Média
50x50 m ²	30 m	0,243	0,461	0,568	0,635	0,477
	60 m	0,322	0,540	0,643	0,695	0,550
	100 m	0,493	0,676	0,753	0,801	0,681
	ADAPT	0,227	0,454	0,564	0,631	0,469
	IDEAL	0,221	0,452	0,562	0,630	0,466
100x100 m ²	30 m	0,713	0,722	0,749	0,771	0,739
	60 m	0,338	0,548	0,648	0,700	0,558
	100 m	0,493	0,676	0,753	0,801	0,681
	ADAPT	0,330	0,529	0,626	0,675	0,540
	IDEAL	0,221	0,452	0,562	0,630	0,466
150x150 m ²	30 m	0,873	0,873	0,873	0,873	0,873
	60 m	0,535	0,647	0,710	0,749	0,660
	100 m	0,494	0,677	0,753	0,801	0,681
	ADAPT	0,416	0,594	0,678	0,728	0,604
	IDEAL	0,221	0,452	0,562	0,630	0,466
200x200 m ²	30 m	0,928	0,928	0,928	0,928	0,928
	60 m	0,713	0,743	0,776	0,799	0,758
	100 m	0,535	0,696	0,763	0,803	0,699
	ADAPT	0,522	0,653	0,715	0,757	0,662
	IDEAL	0,221	0,452	0,562	0,630	0,466

sendo apresentadas tanto por duração de vídeo, como por área de simulação. Para calcular a taxa da abordagem adaptativa (ADAPT), foi considerada a menor taxa de bloqueio entre as obtidas com os três modos de transmissão estudados, para cada uma das taxas de requisições.

Ao computar a média obtida pelos diferentes esquemas, considerando as quatro áreas estudadas, chega-se aos seguintes valores de taxa de bloqueio média: Modo 8 (30 m) = 0,754 ; Modo 6 (60 m) = 0,632 ; Modo 4 (100 m) = 0,686 ; ADAPT = 0,569 ; e IDEAL = 0,466. Apesar da abordagem adaptativa diminuir a taxa de bloqueio média em pouco mais de 6% em relação a média obtida com o modo de transmissão estático de melhor desempenho médio (Modo 6, cujo alcance é de 60 metros), em casos pontuais a diferença chega a valores significativos. No caso extremo, que ocorre para vídeos com 300 segundos de duração, pode-se notar que a diferença chega a 9,5% para uma área de 50x50 m² e a

19,1% para uma área de 200x200 m², demonstrando a importância da adaptação quando se quer atender ambientes heterogêneos. Por outro lado, os resultados da adaptação só se aproximam dos valores ideais conforme diminui a área e aumenta a duração dos vídeos.

6.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado um estudo sobre o impacto da posição dos clientes no desempenho de sistemas VoD escaláveis sem fio, baseados em pontos de acesso 802.11a co-localizados. Para tanto, foi introduzida uma nova versão do sistema CINAPS (*Cluster of INexpensive Access PointS*), estendida com a nova heurística de controle de associação DBERF que considera a distância entre clientes e o *cluster* de APs como requisito de admissão. A avaliação de desempenho, contemplando diferentes modos de transmissão e tamanhos de área, comprovou que, para uma distribuição uniforme de clientes pela área de simulação, o impacto do alcance ficou limitado ao coeficiente de área descoberta. Além disso, foi mostrado que, apesar da abordagem adaptativa de escolha de modo de transmissão ter sido capaz de diminuir a taxa de bloqueio média em pouco mais de 6% em relação a média obtida com o modo de transmissão estático de melhor desempenho médio (Modo 6, cujo alcance efetivo é de 60 metros), em casos pontuais a diferença chegou a valores significativos (mais de 19% para uma área de 200x200 m²).

Em resumo, neste capítulo foram introduzidas as seguintes contribuições originais para o estado-da-arte de sistemas SWVoD baseados em pontos de acesso co-localizados:

1. Proposta de uma nova versão do sistema CINAPS consciente da distância, incrementada com consideração de distância entre clientes e o *cluster* de APs;
2. Avaliação do impacto da distância no desempenho do CINAPS para diferentes modos de transmissão do 802.11a e tamanhos de área simulada;
3. Investigação da eficácia de um esquema adaptativo de escolha do modo de operação para a redução da taxa de bloqueio média;

No próximo capítulo, a proposta do CINAPS, apresentada no capítulo atual e nos anteriores, é extrapolada tal que múltiplas unidades do CINAPS serão empregadas como blocos básicos de uma grade (*grid*) de distribuição, visando maximizar o uso dos modos de transmissão de maior vazão efetiva em áreas de simulação significativamente maiores que as áreas de cobertura normalmente atendidas, limitadas pelo curto alcance efetivo destes modos.

Capítulo 7

Sistema de Distribuição em Grade

No capítulo anterior foi analisado o impacto da posição dos clientes no desempenho do sistema CINAPS usando uma nova heurística consciente da distância, chamada DBERF (*Distance-aware BERF*), focado em diferentes modos de transmissão do padrão IEEE 802.11a e vários tamanhos de área. Esta análise mostrou que, para uma distribuição uniforme de clientes pela área de simulação, a influência da distância, de forma geral, ficou limitada ao CAD (Coeficiente de Área Descoberta), que corresponde a porcentagem de área de simulação não coberta pelo *cluster* de APs co-localizados. Associado a isso, a avaliação também mostrou que uma abordagem adaptativa de seleção de modo de transmissão pode reduzir a taxa de bloqueio (porcentagem de requisições de vídeo que são rejeitadas pelo sistema) em até 19% em casos particulares, mas apenas 6% em comparação com um esquema estático usando o modo de transmissão que obteve, em média, o melhor desempenho. Além disso, os resultados salientaram que mesmo usando uma abordagem adaptativa, o desempenho continuou significativamente pior que o caso ideal (hipoteticamente, o caso onde todos os cliente estão dentro da área de cobertura e podem ser atendidos usando o modo de transmissão de maior vazão efetiva).

Visando preencher esta lacuna, neste capítulo é proposta e avaliada uma extrapolação do sistema CINAPS proposto anteriormente, denominado GAPS (*Grid of collocated Access PointS*), cujo objetivo principal é a formação de uma grade (*grid*¹) de distribuição otimizada.

No GAPS cada *cluster* (CINAPS) é responsável por uma “área de atendimento”, correspondente a uma fração da área total a ser atendida, igualmente dividida pela quantidade

¹Como existem diversas definições de *grid*, tanto na área de ciência da computação como em outras áreas, nesta tese o termo é usado para representar um conjunto interconectado de sistemas autônomos (instâncias do sistema CINAPS), onde cada um é responsável pelas ações no seu domínio administrativo, cuidando da sua própria carga de trabalho (atendimento de requisições de vídeo provenientes da sua área de atendimento) usando seus próprios recursos (basicamente os seus APs ativos).

de *clusters*. Assim, um cliente posicionado na área de atendimento de um determinado *cluster* sempre será atendido através de um dos APs ativos (*Active APs*)² deste *cluster* particular, mesmo que esteja na área de cobertura de mais de um *cluster*, a qual é definida pelo alcance efetivo do modo de transmissão usado em cada *cluster*.

Como consequência do que foi exposto acima, o comportamento do GAPS pode ser reduzido a soma dos comportamentos dos seus *clusters*. Por exemplo, em um GAPS com quatro *clusters* de 3-APs (*clusters* com três APs ativos), dado um determinado tamanho de área (AS) e taxa de chegada de requisições (λ), onde os clientes estão uniformemente distribuídos pela área, cada área de atendimento possuirá um tamanho igual a $AS/4$ e a taxa de requisições em cada *cluster* será igual a $\lambda/4$, em média. Dependendo do modo de transmissão usado, cada *cluster* possuirá um determinado CAD, tal que quanto maior é o alcance efetivo do modo de transmissão, menor tende a ser o CAD. Portanto, para computar a taxa de bloqueio (BR) de requisições de todo GAPS, basta descobrir a BR de cada um dos seus *clusters* usando os parâmetros derivados descritos. Depois disso, como cada *cluster* recebe a mesma quantidade de requisições, a BR geral do GAPS será igual a BR dos *clusters* (todas iguais neste exemplo).

Embora o exemplo apresentado trate de um caso simplificado, onde os clientes estão uniformemente distribuídos pela área, um raciocínio similar pode ser aplicado nos casos em que clientes posicionam-se de forma mais concentrada na área de atendimento de um ou mais *clusters*. Neste caso, a taxa de chegada de requisições de vídeo em cada *cluster* corresponderá a uma diferente fração de λ , de acordo com o padrão de concentração de clientes (*Client Concentration Pattern* - CCP). Neste caso, para computar a BR geral do GAPS é utilizada uma média ponderada para capturar a correta importância da taxa de bloqueio de cada um dos *clusters*, de acordo com a porcentagem de requisições realizadas a partir do *cluster* correspondente.

Outra interessante questão é como o GAPS responde a modificações no CCP. Uma abordagem estática, do ponto de vista da quantidade de APs por *cluster*, tende a ser simples de implementar (os APs e seus canais correspondentes podem ser atribuídos aos *clusters* estaticamente de modo que cada *cluster* poderá contar com um número fixo de APs) mas intuitivamente tende a apresentar uma degradação de desempenho causada pelo desbalanceamento causado por modificações no CCP. Por outro lado, um abordagem di-

²Assume-se, hipoteticamente, que os APs podem estar em apenas um entre dois estados: a) ativo (*active*), onde está operando como o concentrador de um determinado canal, ou b) espera (*stand-by*), onde aguarda para se tornar ativo. Desta forma, um mesmo canal pode ser atribuído a múltiplos APs em *clusters* distintos, mas apenas um deles pode estar ativo em um determinado instante.

nâmica, onde a quantidade de APs por *cluster* se altera de acordo com o CCP, pode resolver o problema do desbalanceamento, porém pode ser significativamente mais complexa de implementar (precisa gerenciar de forma eficiente os estados *active/stand-by* dos APs).

Após esta visão geral, a próxima seção apresenta detalhes do GAPS como uma extensão do sistema CINAPS. Na seção posterior, é descrita a análise experimental, incluindo a avaliação dos resultados obtidos, seguida das considerações finais.

7.1 Proposta do Sistema GAPS

Nesta seção, é descrito em detalhes o esquema usado no GAPS, mostrando como a abordagem de *grid* difere de um único *cluster* de APs co-localizados, tanto para o esquema estático quanto para o dinâmico.

Basicamente, o GAPS pode ser visto como uma coleção de instâncias de CINAPS onde cada instância pode ter diferentes quantidades de APs ativos. Contudo, a soma de APs ativos, distribuídos pelos *clusters* pode ser no máximo igual ao número de canais não sobrepostos definidos pelo padrão de WLAN adotado (neste estudo, até 12 APs podem estar ativos, que é o número máximo oferecido pelo padrão considerado, o IEEE 802.11a, no Brasil e nos EUA). A Figura 7.1 ilustra quatro possíveis instalações para uma área de 100x100 m², sendo que a primeira (superior esquerda) usa um único CINAPS e as outras três usam GAPS, todas elas empregando o mesmo modo de transmissão (o que implica na mesma área de cobertura de rádio). Fica claro que o uso de um único CINAPS tende a alcançar um maior percentual de área descoberta (CAD). Por conseguinte, é capaz de atender apenas clientes concentrados no centro da área. Por outro lado, o CINAPS pode usar a máxima largura de banda agregada disponibilizada pelo modo de transmissão, o que melhora o serviço oferecido aos clientes posicionados dentro da sua área de cobertura.

De maneira distinta, o GAPS potencialmente atinge um menor CAD, permitindo atender clientes mais dispersos. A sua limitação está no fato de que a largura de banda agregada também fica distribuída pelos *clusters*, proporcional a quantidade de APs ativos (três possibilidades são mostradas). Porém, se o escalonamento de APs ativos nos *clusters* não for eficiente em acompanhar o padrão de concentração dos clientes (CCP), a largura de banda disponível em alguns *clusters* poderá ser maior do que a sua necessidade enquanto que em outros poderá ser inferior ao necessário, causando uma degradação no desempenho do sistema como um todo.

Conforme mostrado na Figura 7.2, a principal diferença existente entre GAPS e CI-

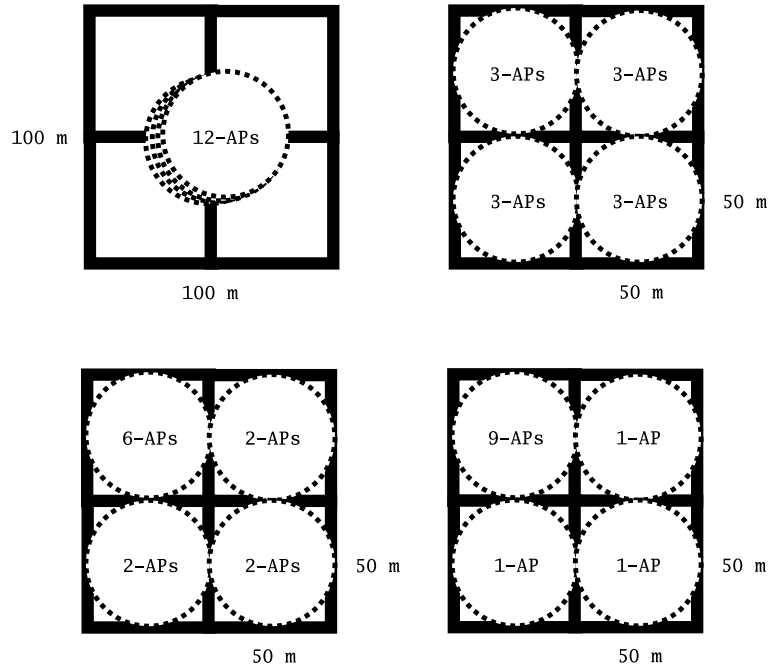


Figura 7.1: Comparação de diferentes instalações usando CINAPS e GAPS

NAPS, do ponto de vista da arquitetura de *software* do sistema, é que o esquema em *grid* usa uma instância de WCM para cada *cluster* (o VS não é afetado) e introduz um novo componente, denominado *WCM Supervisor* (WCMS), descrito abaixo.

7.1.1 Supervisor de WCMS

O WCMS é um componente responsável por orquestrar a operação das instâncias de WCM correspondentes a cada um dos *clusters*, tendo duas funções:

Encaminhamento de Requisições: o WCMS centraliza o recebimento de mensagens de sinalização. Quando uma requisição de vídeo chega até ele, o WCMS precisa encaminhar a requisição para o WCM do *cluster* responsável pela área de atendimento onde o cliente está posicionado, usando para isso as informações providas por um mecanismo de localização (mencionado na descrição da heurística DBERF, no capítulo anterior);

Escalação de APs Ativos: o WCMS é responsável pelo escalação dinâmico de APs ativos aos *clusters*, dependendo do CCP. Como neste projeto são considerados apenas canais não sobrepostos e sem interferência co-canal, o WCMS deve realizar o escalação respeitando a restrição de que um AP a ser ativado em um determinado *cluster* não use um canal já ativo em outro *cluster*.

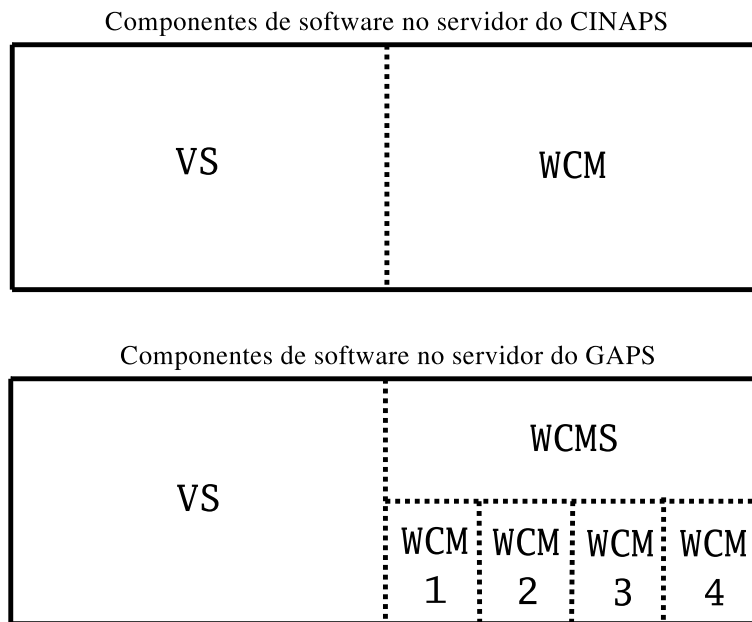


Figura 7.2: Arquitetura de *software* do CINAPS e do GAPS

7.1.1.1 *Grid* Estático

Em um *grid* estático, a operação do WCMS fica restrita ao encaminhamento de requisições porque assume que a quantidade de APs ativos por *cluster* é definida *a-priori*.

7.1.1.2 *Grid* Dinâmico

No caso de um *grid* dinâmico, o WCMS deve também executar a tarefa de escalonamento de APs ativos. Cabe ressaltar que este trabalho restringe-se a apresentação das funções básicas que o algoritmo de escalonamento do GAPS deve executar. Entretanto, como isto deve ser implementado é considerado um trabalho futuro.

Inicialmente, todos os *clusters* possuem apenas um AP ativo. Conforme a necessidade (crescimento na taxa de requisições em uma determinada área de atendimento), APs extras são ativados *on-the-fly* pelo WCMS a partir de uma lista de canais disponíveis. Se a carga em um AP ativo de um determinado *cluster* cai para zero e o seu WCM não possui uma nova requisição escalonada para o referido AP, o WCM coloca o AP em modo *stand-by* e sinaliza o WCMS para que adicione o canal usado pelo referido AP na lista de canais disponíveis. Além disso, se a lista de canais disponíveis está vazia e o WCMS detecta uma mudança no CCP, ele dispara um procedimento de liberação de canais baseado no novo padrão de concentração. Por exemplo, se um *cluster* possui seis APs ativos (porque o padrão inicial era tal que 50% das requisições eram feitas a partir de sua área de aten-

dimento) é sinalizado pelo WCMS para liberar três APs (assumindo que o padrão atual mostra que apenas 25% das requisições passaram a ser feitas a partir da sua área de atendimento), o seu WCM irá marcar os três APs cuja largura de banda será liberada mais cedo como indisponíveis, de modo que, para as próximas requisições de vídeo recebidas, estes APs não serão considerados no processo de alocação preguiçosa de sub-canais descrito no Capítulo 4. Depois de um certo intervalo de tempo, a carga nos APs marcados como indisponíveis cai para zero, permitindo que o WCM coloque os APs em modo *stand-by* e sinalize o WCMS para que este atualize a lista de canais disponíveis, os quais serão escalonados aos outros *clusters* conforme o novo padrão de concentração de clientes.

7.2 Análise Experimental

Nesta seção é avaliado o desempenho do GAPS e do CINAPS usando apenas os canais providos pelo padrão 802.11a. Inicialmente são descritos os cenários alvo, traduzidos nos parâmetros de entrada de uma versão estendida da ferramenta de simulação TCHE (mais detalhes no Apêndice A). Depois, são definidas as métricas consideradas na análise. Após, usando como base a métrica taxa de bloqueio, são comparados os resultados coletados nos experimentos usando GAPS e CINAPS (com a heurística DBERF de controle de associação) para os dois modos de transmissão de maior vazão efetiva, incluindo uma comparação de desempenho entre um esquema adaptativo de seleção de modo de transmissão com um estático, e também com um caso ideal hipotético (heurística BERF com a maior vazão efetiva). Além disso, é investigada a influência dos esquemas estático e dinâmico no desempenho do GAPS para diferentes padrões de concentração de clientes (CCP), o qual expressa a forma como os clientes estão distribuídos pela área de simulação.

Posteriormente, é formulado um cenário hipotético de instalação do sistema para comparar o GAPS dinâmico com o CINAPS usando duas novas métricas propostas sob uma perspectiva complementar a da escalabilidade, chamadas de *Potential Payback Time* e *Potential Monthly Net Income*. Estas métricas foram criadas para permitir uma avaliação quantitativa sobre a relação de custo e receita potencial destes sistemas, de modo que a sua análise é considerada opcional.

7.2.1 Cenário de Simulação

No presente estudo, é considerado um cenário similar ao usado nas simulações do capítulo anterior, diferenciando-se basicamente pela forma como os clientes estão distribuídos

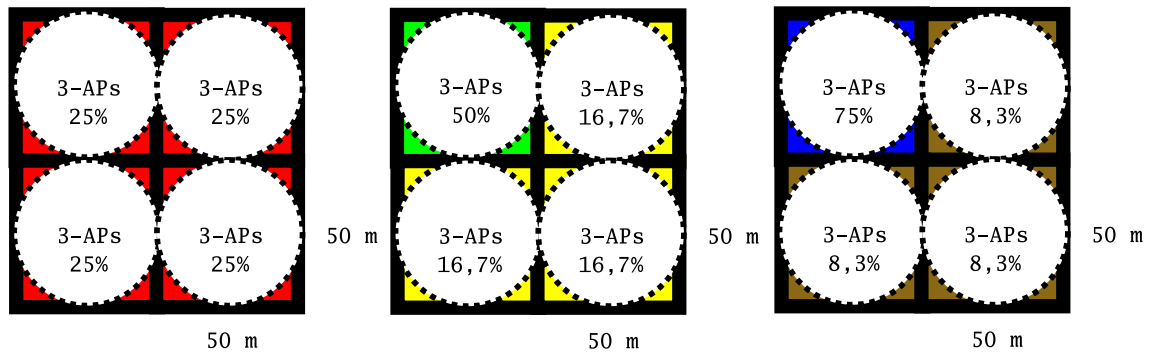


Figura 7.3: GAPS estático de quatro *clusters* com 3 APs cada para três padrões de concentração de clientes

na área de simulação ($100 \times 100 \text{ m}^2$), dependente do padrão de concentração de clientes (CCP) investigado. No caso do CINAPS, é assumido um *cluster* de APs co-localizados posicionado no centro da área de simulação. Por outro lado, no caso do GAPS, é assumido que cada *cluster* ficará posicionado no centro de sua respectiva área de atendimento.

Em particular, os experimentos se concentram nos quatro casos representativos ilustrados na Figura 7.1, os quais são assim configurados:

- CINAPS: 12 APs;
- GAPS com Quatro *Clusters*: 3 APs ativos em cada;
- GAPS com Quatro *Clusters*: 6 APs ativos em um deles e 2 em cada um dos outros três;
- GAPS com Quatro *Clusters*: 9 APs ativos em um deles e 1 em cada um dos outros três.

Para os casos com GAPS, tanto no esquema estático (Figura 7.3) quanto no dinâmico (Figura 7.4), o estudo é restrito a três tipos de CCPs, como segue:

- 25% dos clientes concentrados na área de atendimento de cada um dos *Clusters*;
- 50% dos clientes concentrados na área de atendimento de um dos *Clusters* e os outros 50% igualmente distribuídos nas dos outros três;
- 75% dos clientes concentrados na área de atendimento de um dos *Clusters* e os outros 25% igualmente distribuídos nas dos outros três;

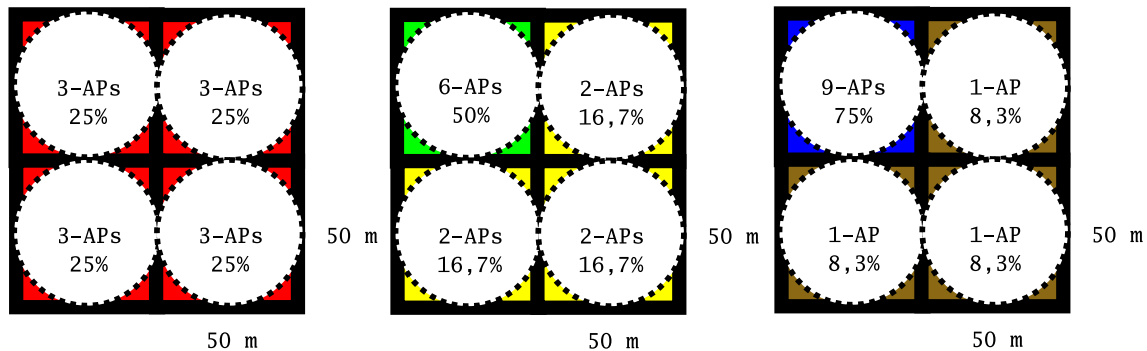


Figura 7.4: GAPS dinâmico de quatro *clusters* com diferentes quantidades de APs ativos dependendo do padrão de concentração de clientes

7.2.2 Extensão da Ferramenta de Simulação

Para medir o desempenho do GAPS estático com quatro *clusters* para um determinado padrão de concentração de clientes (CCP), foi desenvolvida uma nova extensão para a ferramenta TCHE empregada nos experimentos do capítulo anterior (estendida com o suporte a simulação de diferentes áreas de cobertura). Esta extensão permite que a ferramenta execute uma instância para cada um dos quatro *clusters* (usando as suas quantidades de APs ativos correspondentes, taxas de chegada de requisições como sendo uma fração de λ determinada pelo CCP, e o tamanho da área de atendimento igual a um quarto da área total de simulação) e compute a taxa de bloqueio geral do GAPS usando uma média ponderada das taxas de bloqueio obtidas nos quatro *clusters*.

7.2.3 Parâmetros de Simulação

Por simplificação, são analisados apenas os dois modos de transmissão do padrão 802.11a que alcançam maior vazão efetiva – modos 8 e 6 – cujas relações de alcance efetivo/vazão efetiva são, respectivamente, 30 m / 21 Mbps e 60 m / 16 Mbps, conforme reportado em [55]. A Tabela 7.1 apresenta o coeficiente de área descoberta (CAD) obtido com as combinações de AS e ALC investigadas.

Assim como no capítulo anterior, a análise se concentra em vídeos curtos de mesma duração e taxa (pelos motivos expostos anteriormente). O simulador é executado dez vezes para cada combinação dos parâmetros apresentados na Tabela 7.2, usando diferentes sementes. Com base nestas múltiplas execuções, são computadas as médias aritméticas com intervalos de confiança de 95% (representados como barras de erros nos gráficos), as quais são mostradas nas figuras que comparam o desempenho de GAPS e CINAPS. As outras figuras (comparação entre o esquema estático e os dinâmicos de GAPS) apresentam

Tabela 7.1: Coeficiente de Área Descoberta (CAD) para AS e ALC avaliadas

AS	ALC	CAD
50x50 m ²	30 m	0,049
	60 m	0,000
100x100 m ²	30 m	0,717
	60 m	0,049

Tabela 7.2: Parâmetros da Simulação

Parâmetro	Padrão	Variação
Tempo de Simulação - (TS) - (s)	3600	N/A
Taxa dos Vídeos - (V_{rate}) - (Mbps)	1	N/A
Número de Vídeos - (V_{total}) - (unidades)	100	N/A
Duração dos Vídeos - V_{length} - (s)	1200	300-1200
Número de APs - AP_{total} - (unidades)	12	1, 2, 3, 6, 9, 12
Vazão dos APs - $AP_{throughput}$ - (Mbps)	21	16, 21
Taxa de Chegada - λ - (requisições/min)	60	4-120
Fator de Paciência - PF - (s)	$\frac{V_{length}}{2}$	150-600

apenas a média ponderada.

7.2.4 Métricas de Desempenho

Para avaliar quantitativamente o desempenho do GAPS para as várias combinações de parâmetros, é usada como métrica principal a taxa de bloqueio (*blockage rate* - BR) anteriormente descrita. Para uma avaliação complementar à questão da escalabilidade, foram criadas duas novas métricas responsáveis por capturar a relação entre o custo da infraestrutura de rede sem fio (*Wireless Infrastructure Cost* - WIC) e a receita potencial por hora (*Potential Hourly Revenue* - PHR) gerada por requisições de vídeo atendidas com sucesso.

A primeira métrica é chamada de *Potential Payback Time* (PPT), que quantifica o número médio horas necessário para que o custo de infra-estrutura de rede sem fio inteiramente pago pela receita obtida na venda do serviço. PPT é calculado da seguinte forma:

$$PPT = \frac{WIC}{PHR} \quad (7.1)$$

tal que, quanto mais curto é o PPT, mais eficiente é o sistema projetado.

A segunda métrica é chamada de *Potential Monthly Net Income* (PMNI), que mede a lucratividade potencial do sistema implementado no intervalo de um mês, baseado no número de horas em que o sistema é efetivamente usado em um mês (UHM). PMNI é calculado como segue:

$$PMNI = (PHR * UHM) - WIC \quad (7.2)$$

de modo que quanto maior é o PMNI, maior é a lucratividade do sistema projetado.

7.2.5 Avaliação de Desempenho

Nesta subseção, inicialmente são apresentados os resultados relacionados a métrica de escalabilidade. Após, são expostos os resultados complementares obtidos com as métricas de custo-receita.

7.2.5.1 Análise de Escalabilidade

A Figura 7.5 compara a taxa de bloqueio (BR) obtida com CINAPS e GAPS para os modos de transmissão que atingem alcance efetivo de 30 e 60 metros e que fornecem vazão efetiva por AP em torno de 21 e 16 Mbps, respectivamente. Note que estes resultados foram coletados assumindo clientes uniformemente distribuídos em uma área com tamanho igual a 100x100 m². Para servir como uma base complementar de comparação, também é incluída a taxa de bloqueio que seria resultante de um caso ideal hipotético do CINAPS (IDEAL), assumindo CAD = 0, $AP_{throughput} = 21$ Mbps e $AP_{total} = 12$. Como descrito no capítulo anterior, quando a BR do caso IDEAL é comparada com a BR efetivamente obtida pelo CINAPS, pode-se notar que esta é apenas afetada significativamente pelo CAD quando a BR obtida no caso IDEAL é inferior ao CAD (BR < CAD).

Um comportamento similar aparece quando GAPS é comparado com IDEAL. Entretanto, como o CAD do GAPS é apenas 0,049 usando o modo de maior vazão efetiva, o desempenho geral de GAPS se aproxima significativamente do ideal. Diferentemente do CINAPS, que apenas consegue usar de forma eficiente este modo nos casos que combinam alta taxa de chegada com vídeos de mais longa duração.

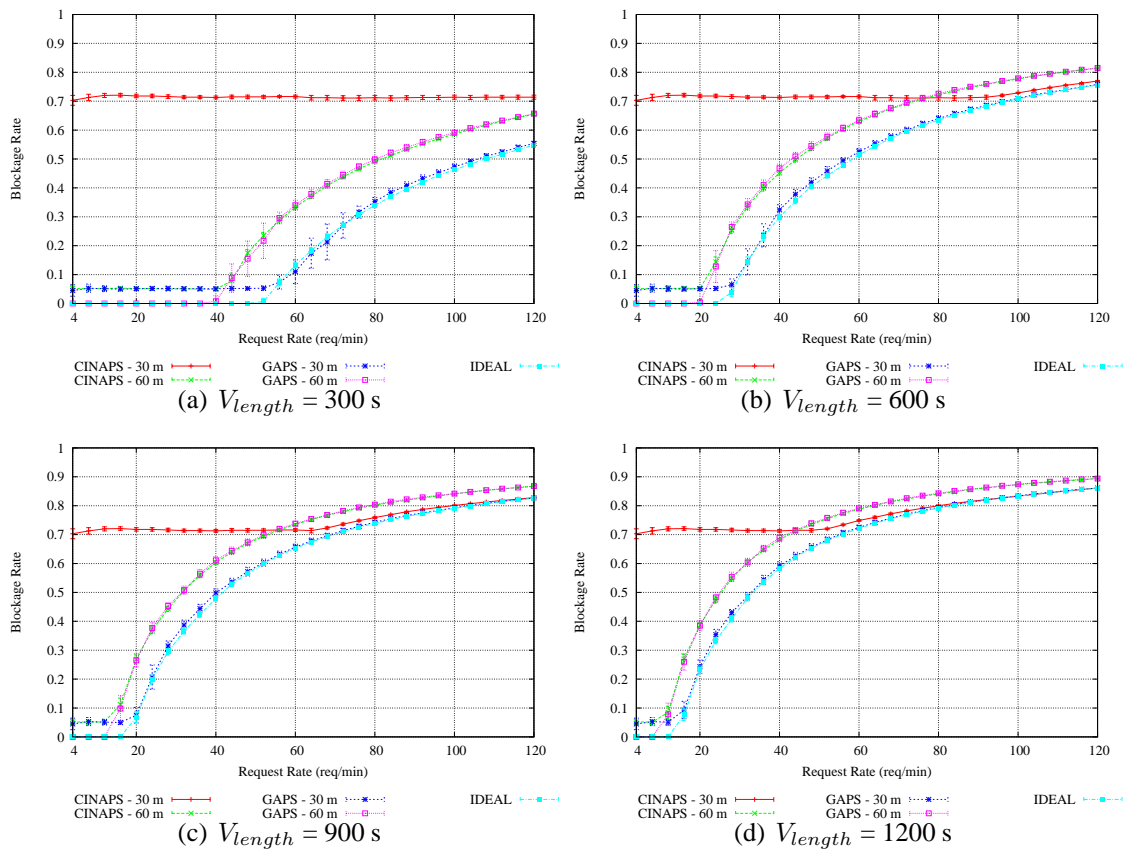


Figura 7.5: Resultados comparativos de CINAPS e GAPS ($AS = 100 \times 100 \text{ m}^2$ e $AP_{throughput} = 21 \text{ Mbps} - 30 \text{ m} / 16 \text{ Mbps} - 60 \text{ m}$) com o caso ideal

Estes resultados podem ser resumidos através da taxa de bloqueio média (*average blockage rate* - *ABR*), cujos valores são apresentados nas Tabelas 7.3 e 7.4. A *ABR* é computada a partir das 30 diferentes taxas de chegada de requisições investigadas, para cada duração de vídeo e modo de transmissão, tanto para o CINAPS quanto para o GAPS. Note que também foram incluídas nas tabelas os valores de *ABR* relacionados ao caso ideal (IDEAL) e a um caso adaptativo hipotético (ADAPT), o qual assume que o sistema é capaz de selecionar o modo de transmissão mais eficiente de acordo com a situação. Para computar *ABR* de ADAPT, é considerada o menor entre os valores de taxa de bloqueio medidos com os dois modos de transmissão, para cada uma das taxas de chegada de requisições. Note que a ADAPT pode ser vista como um *upper bound* de desempenho, tanto para o CINAPS como para o GAPS. Neste caso, pode-se verificar que o GAPS foi capaz de reduzir a *ABR* para todas as durações de vídeo investigadas: um máximo de 33,4% para vídeos de 300 s; um mínimo de 6,5% para vídeos de 1200 s; e uma redução global de 13,5%.

Tabela 7.3: *ABR* de um CINAPS de 12 APs com clientes uniformemente distribuídos

ALC	V_{length}				
	300 s	600 s	900 s	1200 s	Global
30 m	0,714	0,721	0,748	0,768	0,738
60 m	0,323	0,531	0,626	0,680	0,540
ADAPT	0,323	0,516	0,605	0,656	0,525
IDEAL	0,207	0,432	0,542	0,607	0,447

Tabela 7.4: *ABR* de um GAPS de quatro *clusters* de 3 APs cada com clientes uniformemente distribuídos

ALC	V_{length}				
	300 s	600 s	900 s	1200 s	Global
30 m	0,231	0,449	0,554	0,616	0,463
60 m	0,309	0,525	0,623	0,678	0,534
ADAPT	0,215	0,440	0,549	0,613	0,454
IDEAL	0,207	0,432	0,542	0,607	0,447

Por outro lado, se o GAPS for comparado ao CINAPS assumindo que o esquema adaptativo não está disponível, nota-se que enquanto o melhor desempenho obtido pelo CINAPS ocorreu para o modo de transmissão com alcance efetivo de 60 metros, o GAPS atingiu o seu ápice com o modo de maior vazão efetiva (cabe destacar que o CAD é igual em ambos os casos). Nestes casos, o GAPS teve um melhor desempenho porque pôde contar com maior largura de banda agregada, traduzido nos seguintes percentuais de redução: um máximo de 28,5% para vídeos de 300 s; um mínimos de 9,4% para 1200 s; e uma redução global de 14,3%.

As Figuras 7.6 e 7.7 ilustram o desempenho (usando o modo de maior vazão efetiva) das abordagens estática e dinâmica do GAPS, respectivamente, em três cenários relativos a diferentes padrões de concentração de clientes (CCP), o qual define a forma como os clientes estão distribuídos na área de simulação: (A) assumindo clientes uniformemente distribuídos pelas quatro sub-áreas, 25% em cada uma; (B) assumindo a metade dos clientes concentrados em uma sub-área e a outra metade distribuída uniformemente pelas outras três sub-áreas; e (C) assumindo que 75% dos clientes se concentra em uma sub-área e os outros 25% distribuídos uniformemente pelas três outras sub-áreas. En-

Tabela 7.5: *ABR* de um GAPS estático de quatro *clusters* de 3 APs cada para diferentes CCPs

<i>CCP</i>	V_{length}				
	300 s	600 s	900 s	1200 s	Global
(A) 25 %	0,231	0,449	0,554	0,616	0,463
(B) 50 %	0,287	0,480	0,577	0,634	0,494
(C) 75 %	0,455	0,578	0,649	0,692	0,593

quanto a BR não é significativamente afetada pelo CCP quando o esquema de GAPS dinâmico é usado (porque a quantidade de APs ativos por *cluster* é alterada de acordo com a frequência de requisições geradas em cada *cluster*), isto não é verdade para o esquema de GAPS estático (causado pelo desbalanceamento entre a largura de banda disponível e a quantidade de requisições por *cluster*).

A Tabela 7.5 apresenta a *ABR* obtida com cada duração de vídeo e CCPs medidos com o esquema de GAPS estático. Em geral, os valores mostram que o impacto de CCP em *ABR* é forte para vídeos curtos mas pequeno para vídeo de mais longa duração. Por exemplo, de A para C ocorre um grande aumento em *ABR* de 97,0% para vídeos de 300 s; apenas 12,3% para vídeos de 1200 s; e um aumento global de 28,1%.

7.2.5.2 Análise de Custo-Receita

Nas simulações, foi avaliado o desempenho para taxas de chegada de requisições (λ) variando de 4 até 120 requisições por minuto, incrementados de 4 em 4. Usando um progressão aritmética, pode ser visto que o número médio de requisições por hora foi de 3720. Baseado nesta quantidade, é possível realizar uma interessante comparação entre a implantação de um sistema usando um único *cluster* e outro usando o esquema de GAPS dinâmico, aplicando as métricas *Potential Payback Time* (PPT) e *Potential Monthly Net Income* (PMNI) introduzidas neste capítulo. O objetivo é mostrar que o incremento no custo de *hardware* é pago pelo aumento de receita (gerado pela redução na taxa de bloqueio). Nesta análise, são assumidos os seguintes valores unitários: $Custo_{AP} = R\$ 200,00$; $Custo_{SWITCH} = R\$ 200,00$; e $Receita_{VIDEO} = R\$ 0,20$ (por exemplo, uma fração do preço hipoteticamente pago pelo cliente).

Por exemplo, se fosse implantando um projeto usando o sistema CINAPS com 12 APs em um único *cluster* de APs co-localizados, interconectados por um *switch*, o custo de

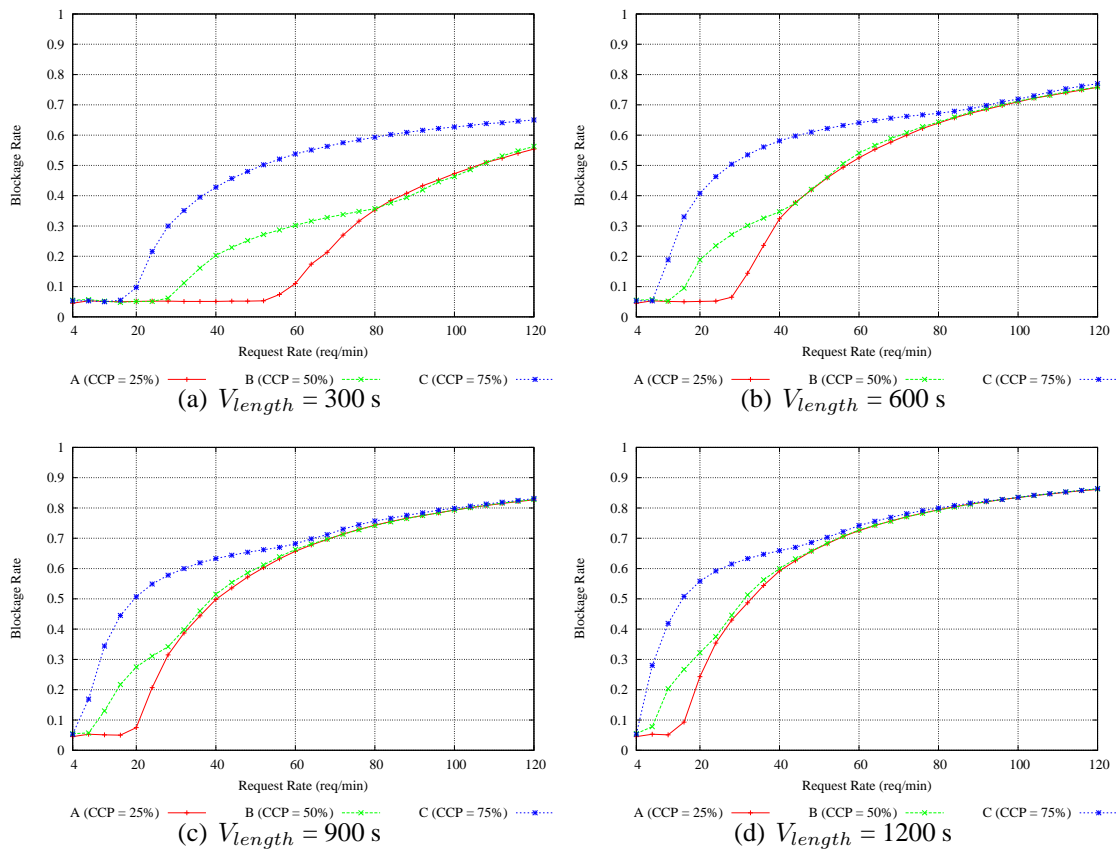


Figura 7.6: Impacto do CCP em um GAPS estático ($AS = 100 \times 100 \text{ m}^2$ e $ALC = 30 \text{ m}$) com quatro *clusters* de três APs cada para diferentes V_{length}

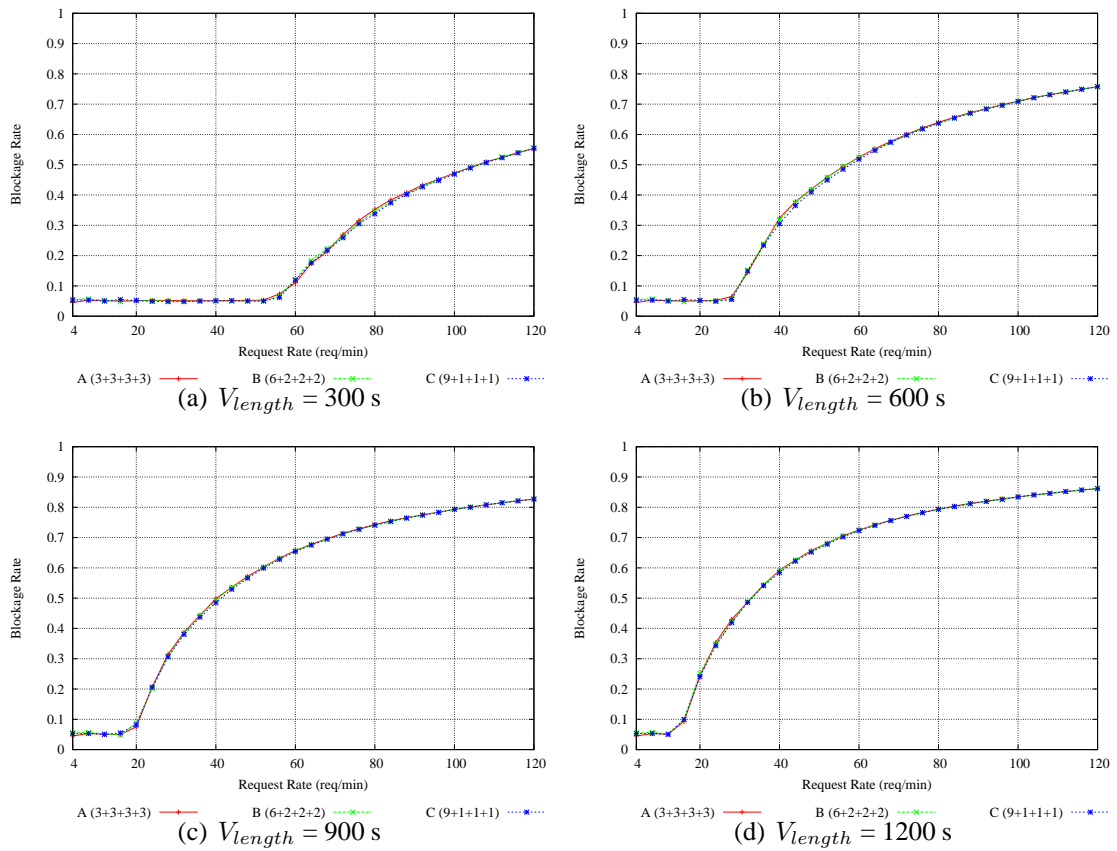


Figura 7.7: Influência de quantidade dinâmica de APs por *cluster* em um GAPS dinâmico ($AS = 100 \times 100 \text{ m}^2$ e $ALC = 30 \text{ m}$) para diferentes V_{length} e distribuições de APs: (A) 3+3+3+3 (CCP = 25%); (B) 6+2+2+2 (CCP = 50%); e (C) 9+1+1+1 (CCP = 75%)

infra-estrutura de rede sem fio (*Wireless Infrastructure Cost - WIC*) seria de R\$ 2600,00. Conforme mostrado na Tabela 7.3, a *ABR* global obtida com o CINAPS no melhor caso (ADAPT) foi de 0,525, de modo que, em média, foram atendidas 1767 requisições. Neste caso, a receita média seria de R\$ 353,40 por hora e o PPT igual a 7,36 horas (em torno de 441 minutos). Note também que, por consequência, a receita mensal total seria de R\$ 35340,00, considerando uma quantidade de horas efetivamente usadas no período de um mês (UHM) equivalente a 5 horas por dia, 5 dias por semana e 4 semanas por mês (UHM = 100 horas = 6000 minutos). Assim, o PMNI do primeiro mês seria de R\$ 32740,00.

Comparativamente, se fosse implantado um projeto usando o sistema GAPS dinâmico, com quatro *clusters* de 9 APs cada (e seus respectivos *switches*), o WIC cresceria para R\$ 8000,00. Contudo, conforme apresentado na Tabela 7.4, a *ABR* global obtida com o GAPS dinâmico no melhor caso (ADAPT) foi de 0,454, tal que, em média, foram atendidas 2031 requisições. Neste caso, a receita média subiria para R\$ 406,20 por hora mas incorreria em um PPT mais demorado, que aconteceria depois de 19,69 horas (cerca de 1182 minutos). Em decorrência disso, mesmo com a receita mensal total crescendo para R\$ 40620,00, considerando o mesmo UHM do caso anterior (100 horas), o PMNI do primeiro mês seria reduzido levemente para R\$ 32620,00. Apesar desta redução insignificante de 0,37% (R\$ 120,00) no lucro líquido previsto para o final do primeiro mês, o uso do GAPS dinâmico viabilizaria um aumento de 14,94% (R\$ 5280,00) no lucro mensal dos meses posteriores.

7.3 Considerações Finais

Neste capítulo, foi introduzido e avaliado o GAPS (*Grid of collocated Access Points*), uma nova abordagem para construção de sistemas VoD escaláveis em redes sem fio. No GAPS, cada um dos *clusters* é responsável por uma diferente sub-área e a quantidade de APs por *cluster* pode ser definida estaticamente ou dinamicamente de acordo com o padrão de concentração dos clientes (CCP), isto é, de acordo com a forma como os clientes estão distribuídos pela área.

Além da apresentação dos detalhes relativos a construção do GAPS tendo como base o CINAPS, sistema proposto nos capítulos anteriores, foram analisados resultados de desempenho que indicaram que o GAPS foi capaz de reduzir significativamente a taxa de bloqueio de requisições de vídeo em comparação com o sistema anterior: considerando clientes uniformemente distribuídos, o GAPS conseguiu usar eficientemente o modo de

transmissão de maior vazão efetiva, aproximando-se significativamente do desempenho obtido no caso ideal hipotético. Mesmo usando um esquema adaptativo hipotético de escolha otimizada de modo de transmissão (considerado o *upper bound* para os dois sistemas), o GAPS alcançou uma redução significativa na taxa de bloqueio média (*ABR*) em comparação ao CINAPS: máxima de 33,4% para vídeos de 300 s; mínima de 6,5% para 1200 s; e redução global de 13,5%. Considerando apenas esquemas não adaptativos (onde o CINAPS e o GAPS possuem o mesmo coeficiente de área descoberta mas diferente largura de banda agregada porque o seu modo de transmissão mais efetivo não é o mesmo), a redução em *ABR* foi similar: máxima de 28,5% para vídeos de 300 s; mínima de 9,4% para 1200 s; e redução global de 14,3%.

Também foi mostrado que um esquema dinâmico de escalonamento de APs para os *clusters* é fundamental para que o GAPS opere eficientemente em ambientes em que o CCP pode variar. Enquanto o desempenho do GAPS dinâmico não foi influenciado significativamente para os três diferentes CCPs considerados, o desbalanceamento entre a largura de banda agregada disponível e o número de requisições por *cluster* ocorrida no GAPS estático afetou negativamente a taxa de bloqueio: crescimento máximo de 97,0% para vídeos de 300 s; mínimo de 12,3% para 1200 s; e aumento global de 28,1%.

Por fim, na análise complementar realizada com as novas métricas quantitativas de custo-receita – *Potential Payback Time* (PPT) and *Potential Monthly Net Income* (PMNI) – introduzidas neste estudo, foi verificado que para o cenário analisado, embora o sistema GAPS Dinâmico tenha gerado um aumento no custo de implantação quando comparado ao sistema com um único *cluster* (causando um aumento no PPT de 7,36 para 19,69 horas), o PMNI do primeiro mês foi praticamente o mesmo. Entretanto, o GAPS dinâmico aumentou em 14,94% o PMNI dos meses seguintes, de R\$ 35340,00 para R\$ 40620,00, decorrente do aumento no percentual de requisições atendidas.

Em resumo, neste capítulo foram introduzidas cinco principais contribuições específicas para o estado-da-arte de sistemas SWVoD baseados em APs co-localizados:

1. Proposta do esquema GAPS, uma extrapolação do sistema CINAPS anteriormente proposto, onde múltiplos *clusters* são usados em conjunto, formando uma grade (*grid*) de distribuição;
2. Estudo detalhado comparando o desempenho do GAPS com quatro *clusters* com o CINAPS, para os dois modos de maior vazão efetiva do padrão 802.11a, no caso em que os clientes estão uniformemente distribuídos pela área;

3. Investigação da eficiência do esquema do GAPS em comparação com o caso ideal onde todos os clientes podem ser cobertos por um único *cluster* usando o modo de transmissão de maior vazão efetiva;
4. Avaliação da potencial diferença de desempenho entre os esquemas do GAPS estático e dinâmico quando submetidos a diferentes padrões de concentração de clientes;
5. Análise complementar quantitativa do impacto da relação existente entre o custo de implantação e a taxa de bloqueio atingida por um GAPS dinâmico no aumento potencial da receita em um cenário hipotético de operação.

Embora as contribuições oferecidas neste capítulo e nos anteriores sejam significativas, as simulações realizadas assumiam premissas e parâmetros baseados em resultados coletados na literatura. No próximo capítulo são avaliadas empiricamente parte destas premissas com o intuito de validar as simulações realizadas, bem como para acrescentar eventuais detalhes práticos à discussão desta tese.

Capítulo 8

Validação Empírica

Nos capítulos anteriores, foram propostas e avaliadas variantes de sistemas VoD escaláveis para redes sem fio baseados em pontos de acesso co-localizados. Embora as contribuições oferecidas nestes capítulos sejam significativas, as simulações realizadas assumiam premissas e parâmetros baseados em resultados coletados na literatura.

Neste capítulo, são avaliadas na prática parte destas premissas com o intuito de validar as simulações realizadas, visando reforçar a viabilidade do uso de pontos de acesso co-localizados como solução escalável eficiente para sistemas VoD em redes sem fio. Em particular, é avaliado o efeito da interferência entre canais adjacentes (*Adjacent Channel Interference* - ACI), o qual, teoricamente, se apresentava como principal limitante para o uso de pontos de acesso co-localizados na sua plenitude, isto é, com todos os canais adjacentes não sobrepostos em uso.

Inicialmente é descrito em detalhes o ambiente de testes *indoor* montado no Laboratório de Computação Paralela (LCP) da COPPE/UFRJ (área de aproximadamente 14x14 m², formada por várias salas com divisórias que combinam madeira com vidro e vários móveis que servem como obstáculo para a transmissão sem fio). Após, é apresentada a metodologia experimental adotada, seguida dos resultados obtidos e das considerações finais.

8.1 Ambiente de Testes

Para a avaliação empírica do uso de pontos de acesso co-localizados, operando em canais adjacentes não sobrepostos, foram usados os seguintes equipamentos para montar o ambiente de testes *indoor*:

- Três APs 3COM 802.11a/b/g, modelo 7760 com o *firmware* original 1.5.22;

- Três WNICs PCI 3COM 802.11a/b/g, *chipset* Atheros;
- Um *switch* LG *Fast Ethernet*, modelo LS3108PA (8 portas);
- Quatro *desktops* Pentium IV 2,4 GHz com Linux Fedora Core 6.

Os quatro *desktops* foram conectados ao *switch* da LAN do LCP. Um destes (cinaps-0) possuía uma segunda interface de rede *Fast Ethernet* através da qual estava conectado ao *switch* LG, usado para interconectar os três APs (configurados como uma ESS com o SSID “cinaps”), formando uma subrede específica do CINAPS na qual o cinaps-0 atuava como *gateway*. Os outros três *desktops wireless* (cinaps-1, cinaps-2 e cinaps-3) usavam as WNICs PCI com o *driver* MADWIFI [50] (versão 0.9.3.1) para se conectar aos APs da subrede CINAPS. Assim, todos os quatro *desktops* estavam conectados as duas subredes, a do LCP e a do CINAPS.

Note que o uso de três APs é suficiente para avaliar o pior caso de canais adjacentes, tal que o canal do meio recebe interferência (de acordo com a máscara de espectro do 802.11 mostrada no Capítulo 2) tanto do canal à esquerda quanto do canal à direita.

8.2 Metodologia Experimental

Para os testes, foi criada a ferramenta WiAssess (Apêndice B) para emular o tráfego centralizado característico do CINAPS (gerado pelo servidor de vídeo ou pelo *proxy*, sem rajadas). Para cada configuração dos ambientes, foi medida a vazão efetiva (medida no receptor durante intervalos de 30 s) para uma crescente taxa de transmissão de pacotes UDP, correspondente ao aumento de usuários simultâneos por AP (fluxo com taxa de 1 Mbps por cliente), até chegar a vazão efetiva do modo de transmissão avaliado. Foram avaliadas diferentes configurações do ambiente, contemplando vários posicionamentos dos *desktops wireless*, bem como para diversas topologias de APs (localizados no centro do laboratório). Neste capítulo, são analisados os experimentos mais relevantes (dentre os vários realizados) para a confirmação das premissas assumidas nos capítulos anteriores, nos quais os equipamentos estavam posicionados conforme a Figura 8.1.

Para minimizar eventuais interferências de pontos de acesso do LCP e de outros laboratórios da COPPE operando na faixa de 2,4 GHz (vários foram detectados durante o período de experimentos, ao longo do segundo semestre de 2007), optou-se por restringir os experimentos ao padrão 802.11a que opera acima de 5 GHz (5,150-5,825 GHz). Mais precisamente, os canais usados nos testes variaram do 36 até o 64 (correspondentes

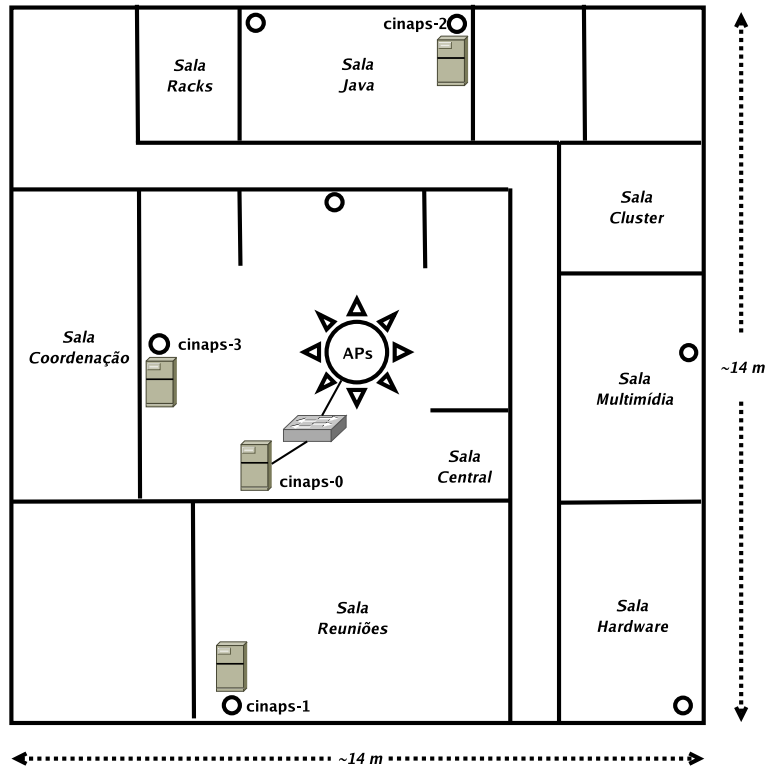


Figura 8.1: Ambiente de testes montado no LCP/COPPE/UFRJ

aos centros de frequência 5,180 e 5,320 GHz, respectivamente). Além disso, foi usado como base o Modo 6 de transmissão nos experimentos de avaliação da ACI (quando não expresso em contrário).

Parte dos experimentos (iniciais e de verificação do impacto da potência de transmissão dos clientes) foram realizados com a versão alfa da ferramenta WiAssess, cujo esquema de temporização causava uma variação na vazão efetiva média computada a partir da vazão efetiva de cada um dos clientes. Nos demais (experimentos para avaliação da influência da potência de transmissão dos APs e de topologia), foi usada a versão beta da ferramenta, onde o esquema de temporização foi otimizado.

8.2.1 Vazão Efetiva dos Modos de Transmissão

Conforme os experimentos preliminares realizados com a ferramenta WiAssess e com a ferramenta Netperf [44], a vazão efetiva dos modos de transmissão de maior vazão, com apenas um ponto de acesso (sem o efeito da ACI), foi de aproximadamente 30 Mbps para o Modo 8, 24 Mbps para o Modo 6 e 14 Mbps para o Modo 4 (valores significativamente superiores aos apresentados na literatura, usados nos testes simulados dos capítulos an-

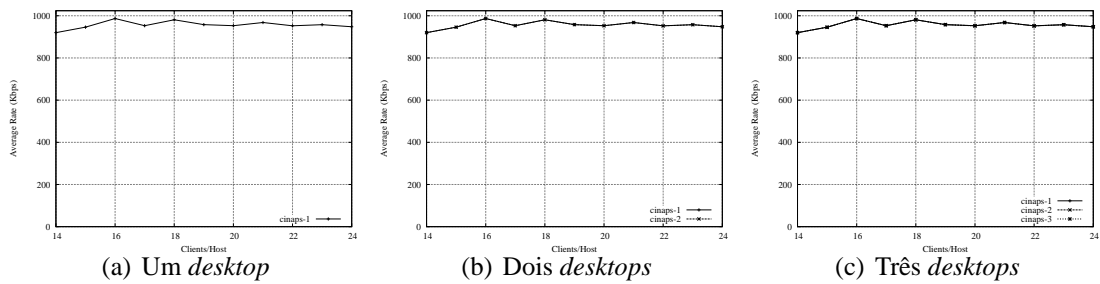


Figura 8.2: Resultados obtidos através da rede cabeada

teriores: 21, 16 e 10 Mbps). Os experimentos que se seguem, a maioria no Modo 6, assumem 24 Mbps como o limite de vazão para os canais (experimentos específicos com o Modo 8 assumem 30 Mbps como limite).

8.2.2 Experimento Base

A Figura 8.2 mostra os resultados (vazão média dos N fluxos de 1 Mbps recebidos em cada um dos *desktops*) coletados com a ferramenta WiAssess alfa através da rede cabeada, os quais servem como base de comparação para os resultados obtidos com a rede sem fio nos experimentos realizados com esta versão da ferramenta. Note que esta versão da ferramenta gerou variações na taxa computada, mesmo sem a ocorrência de erros de transmissão (perdas de pacotes) ou contenção significativa na rede.

8.2.3 Efeito da Interferência entre Canais Adjacentes

Os primeiros experimentos com múltiplos APs operando simultaneamente em canais não sobrepostos foram feitos com uma topologia em formato de estrela (*star-like*), ilustrada na Figura 8.3, com uma distância de um metro entre os APs (WiAssess alfa).

O objetivo era avaliar o impacto da interferência entre transmissões, realizadas através de APs distintos, na vazão efetiva medida nos receptores, tanto para o caso em que os APs usam canais adjacentes (i.é., ocupam faixas de frequência contíguas, sem canal de separação), como para o caso em que um canal de separação é empregado. Os resultados da Figura 8.4 se referem a experimentos com zero (canais 40, 44 e 48 ativos) e com um (canais 40, 48 e 56 ativos) canal de separação, respectivamente, para um, dois e três canais operando simultaneamente.

Analisando as tendências das curvas com dois canais em operação, nota-se que, nos casos em que os APs foram configurados sem canais de separação, ocorreu uma interferência significativa das transmissões realizadas pelo canal 40 na vazão efetiva do canal 44

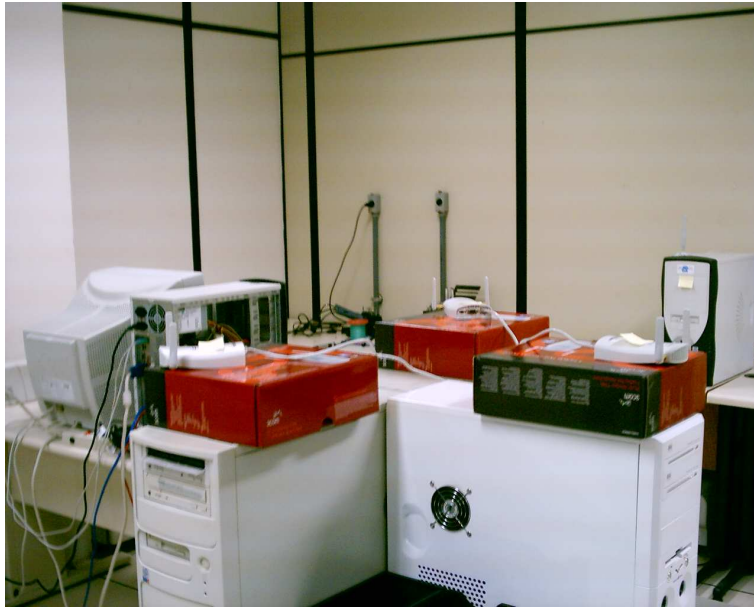


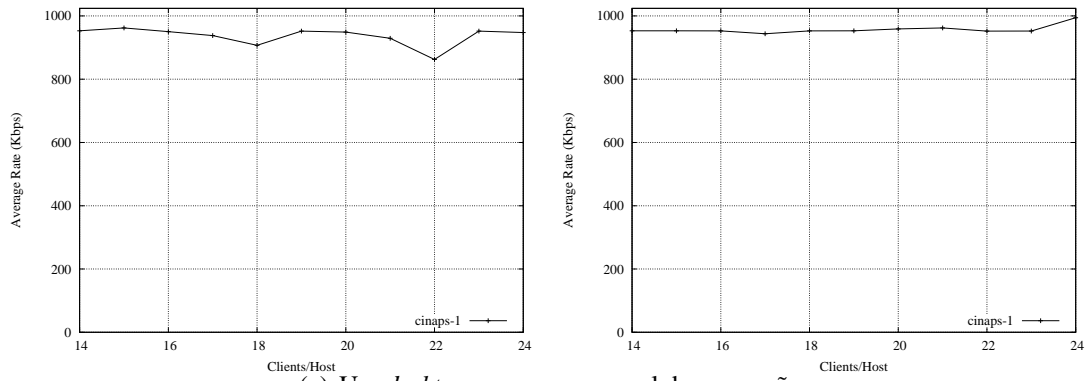
Figura 8.3: Topologia *star-like*

(Figura 8.4(b)). Em geral, quanto maior a taxa de transmissão, maior foi a interferência, provavelmente porque aumentou a chance do mecanismo CCA de detecção de portadora ser afetado no canal 44. Os resultados com os três canais em operação (Figura 8.4(c)) mostraram que a interferência do 44 no 48 só ocorreu para taxas mais altas. Por outro lado, com um canal de separação, a interferência praticamente desapareceu.

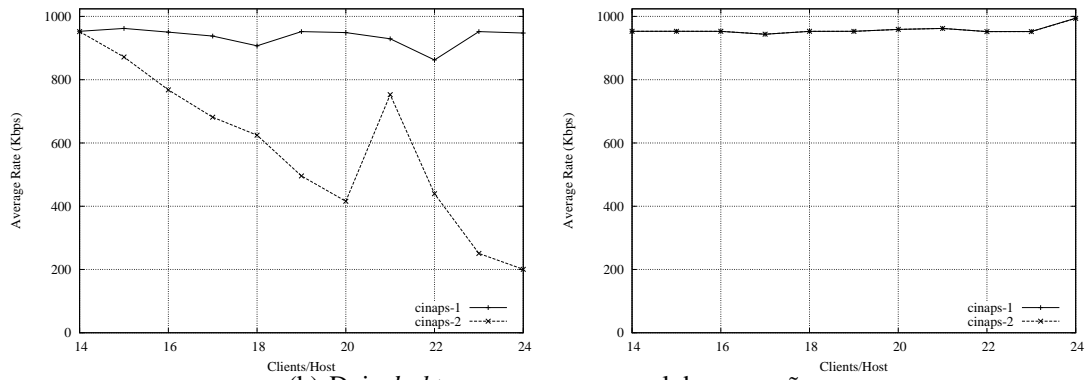
8.2.4 Impacto da Potência de Transmissão dos Clientes

Conforme a dinâmica do 802.11, onde cada pacote recebido com sucesso gera o envio de um pacote ACK (camada MAC) do receptor para o transmissor, parte significativa da interferência entre canais adjacentes verificada nos resultados acima poderia estar relacionada com este mecanismo de confirmação. Para avaliar esta hipótese, os experimentos foram repetidos (WiAssess Alfa) configurando a potência de transmissão (P_{tx}) das WNICs dos *desktops* para valores inferiores ao seu valor padrão (16 dBm) – 13 e 10 dBm – através da ferramenta iwconfig (iwconfig IFACE txpower POWER) [87]. Entretanto, os resultados obtidos para zero canais de separação, mostrados na Figura 8.5, não corroboraram esta hipótese visto que as tendências das curvas (quando comparadas entre si e com as apresentadas na Figura 8.4, relativas a máxima potência) não foram afetadas pela redução na P_{tx} dos clientes.

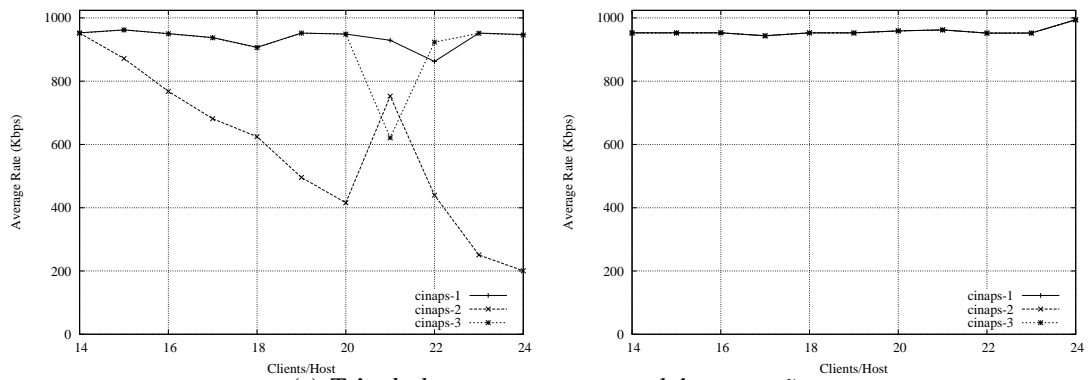
Portanto, os resultados práticos sugerem que o mecanismo de ACK, no cenário ava-



(a) Um *desktop*: sem e com canal de separação

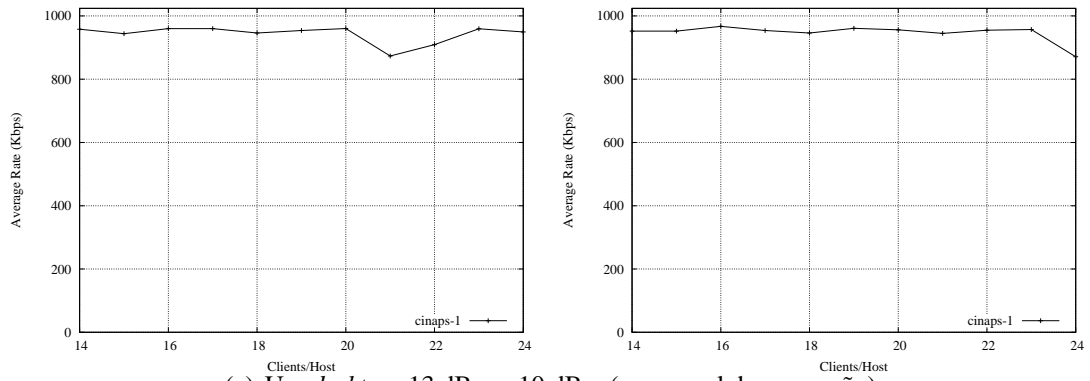


(b) Dois *desktops*: sem e com canal de separação

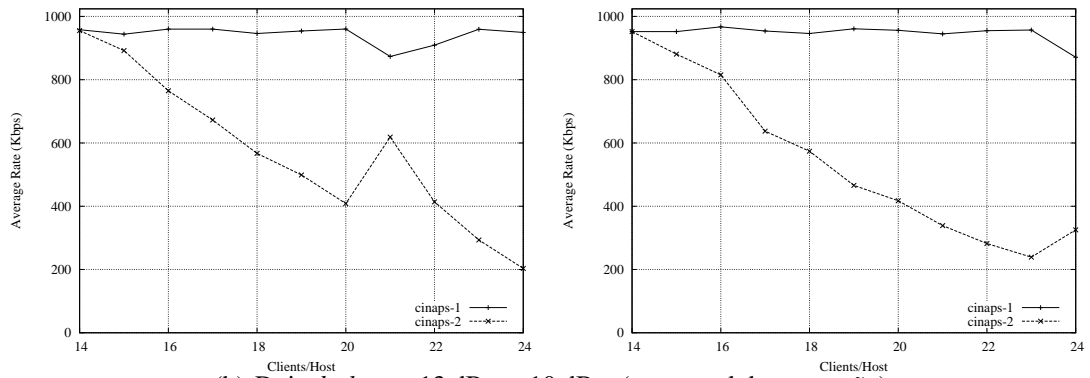


(c) Três *desktops*: sem e com canal de separação

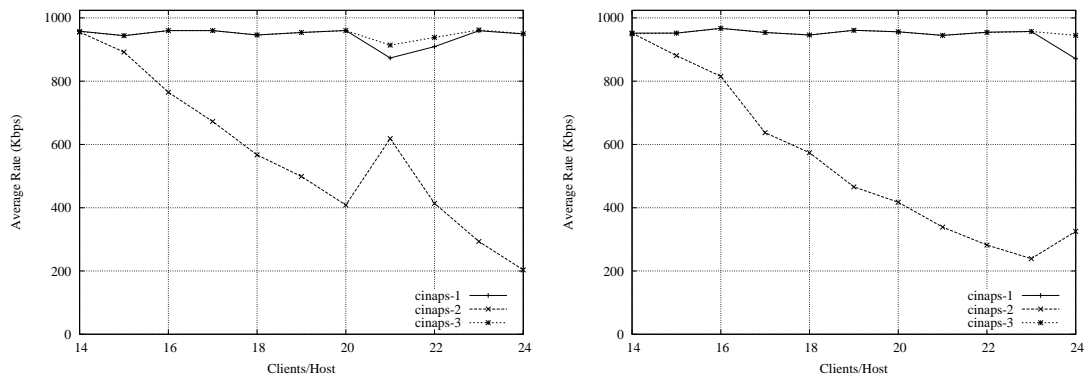
Figura 8.4: Resultados obtidos com a topologia *star-like* (Modo 6)



(a) Um *desktop*: 13 dBm e 10 dBm (sem canal de separação)



(b) Dois *desktops*: 13 dBm e 10 dBm (sem canal de separação)



(c) Três *desktops*: 13 dBm e 10 dBm (sem canal de separação)

Figura 8.5: Resultados para variações na Ptx dos clientes (Modo 6)

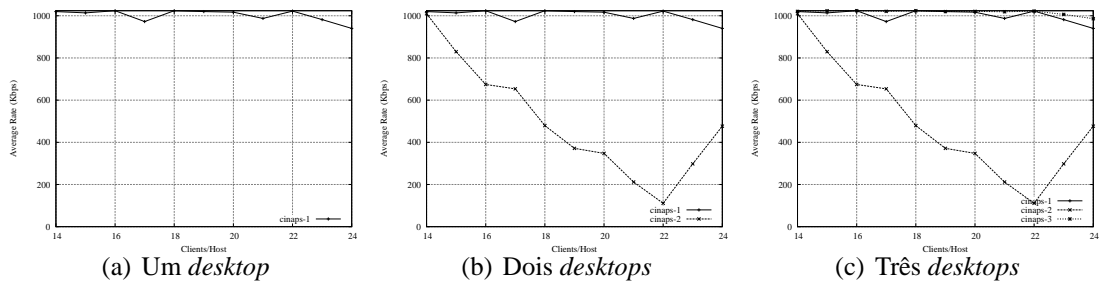


Figura 8.6: Resultados para APs configurados com a máxima (18 dBm) Ptx (Modo 6)

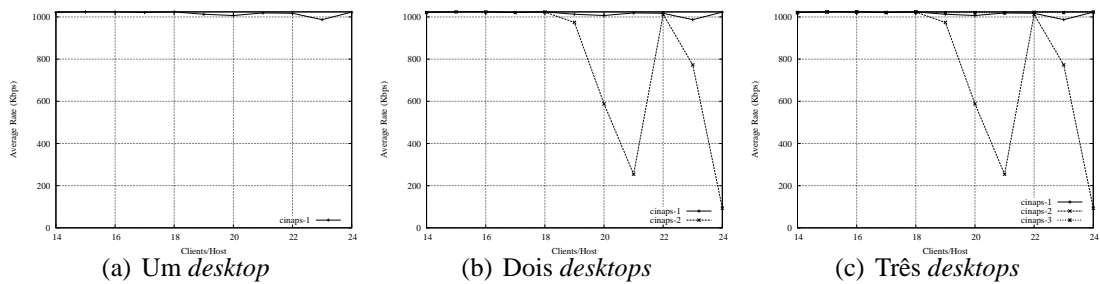


Figura 8.7: Resultados para APs configurados com 1/2 (-3 dB) da Ptx (Modo 6)

liado, não é responsável por parte significativa da ACI.

8.2.5 Impacto da Potência de Transmissão dos APs

Como o mecanismo de ACK não foi determinante na interferência, restou avaliar o efeito da potência de transmissão (Ptx) dos APs, o qual era esperado que fosse o mais grave pela distância pequena entre os dispositivos. Como nestes experimentos foi usada a versão beta da ferramenta WiAssess, são apresentados novamente os resultados obtidos com Ptx máxima dos APs (18 dBm para o Modo 6 [2]), bem como para 1/2 (-3 dB) e um 1/4 (-6 dB).

As Figuras 8.6, 8.7 e 8.8 apresentam os resultados obtidos. Analisando a tendência das curvas, pode-se concluir que a diminuição de 6 dB na Ptx dos APs foi suficiente para eliminar o efeito da ACI no Modo 6.

Por outro lado, no Modo 8 (cuja potência máxima é 16 dBm [2]) a redução de 6 dB não foi suficiente, como mostra a Figura 8.9.

Entretanto, a eliminação da ACI foi possível com uma redução de 9 dB, conforme mostra a Figura 8.10.

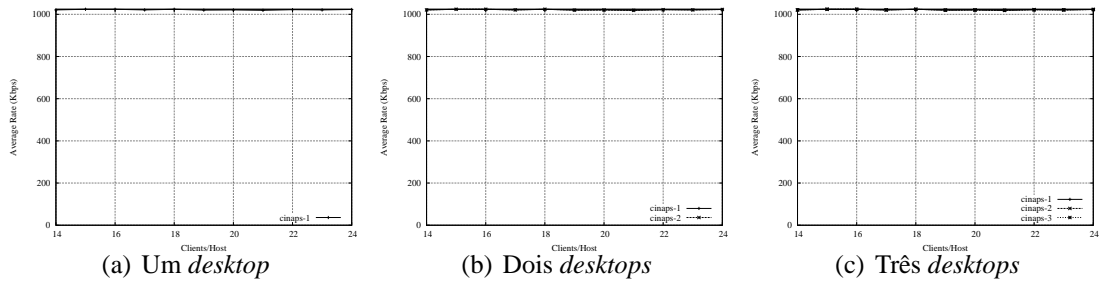


Figura 8.8: Resultados para APs configurados com 1/4 (-6 dB) da Ptx (Modo 6)

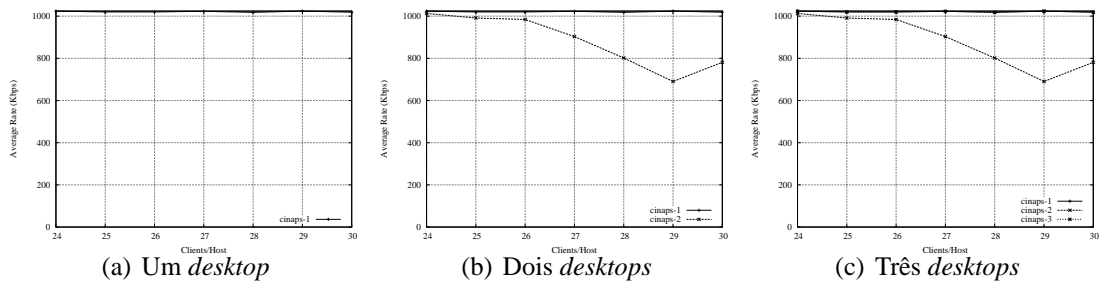


Figura 8.9: Resultados para APs configurados com 1/4 (-6 dB) da Ptx (Modo 8)

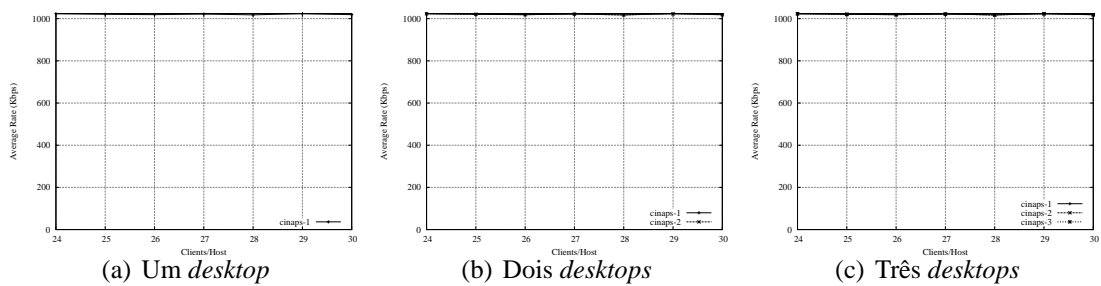


Figura 8.10: Resultados para APs configurados com 1/8 (-9 dB) da Ptx (Modo 8)



Figura 8.11: Topologia *stack-like*

8.2.6 Topologia *stack-like*

Os experimentos com a topologia empilhada (*stack-like*), ilustrada na Figura 8.11, mostraram-se importantes para entender o comportamento resultante de uma topologia mais complexa, eventualmente empregada para diminuir a área ocupada pelo *cluster* de APs, no caso de estar operando próximo da sua capacidade máxima (16 APs).

Nos experimentos realizados (com Ptx dos APs reduzida em 6 dB, no Modo 6), a altura dos APs foi alterada de tal forma que a distância entre o APs do meio e os outros dois variou de 30 até 48 cm. Como resultado, foi verificado que para distâncias inferiores a 48 cm houve ocorrência do efeito da ACI. Portanto, pode-se concluir que uma distância de aproximadamente 50 cm entre APs é suficiente para utilizar efetivamente APs co-localizados em canais adjacentes não sobrepostos em frequência (sem canais de separação). Em virtude disso, um sistema com, por exemplo, 12 APs operando em canais adjacentes do 802.11a, poderia ser instalado em uma área de apenas 50x50 cm², com uma altura de aproximadamente 170 cm (considerando a altura dos APs mais próximos do piso igual a 70 cm), conforme ilustrado na Figura 8.12.

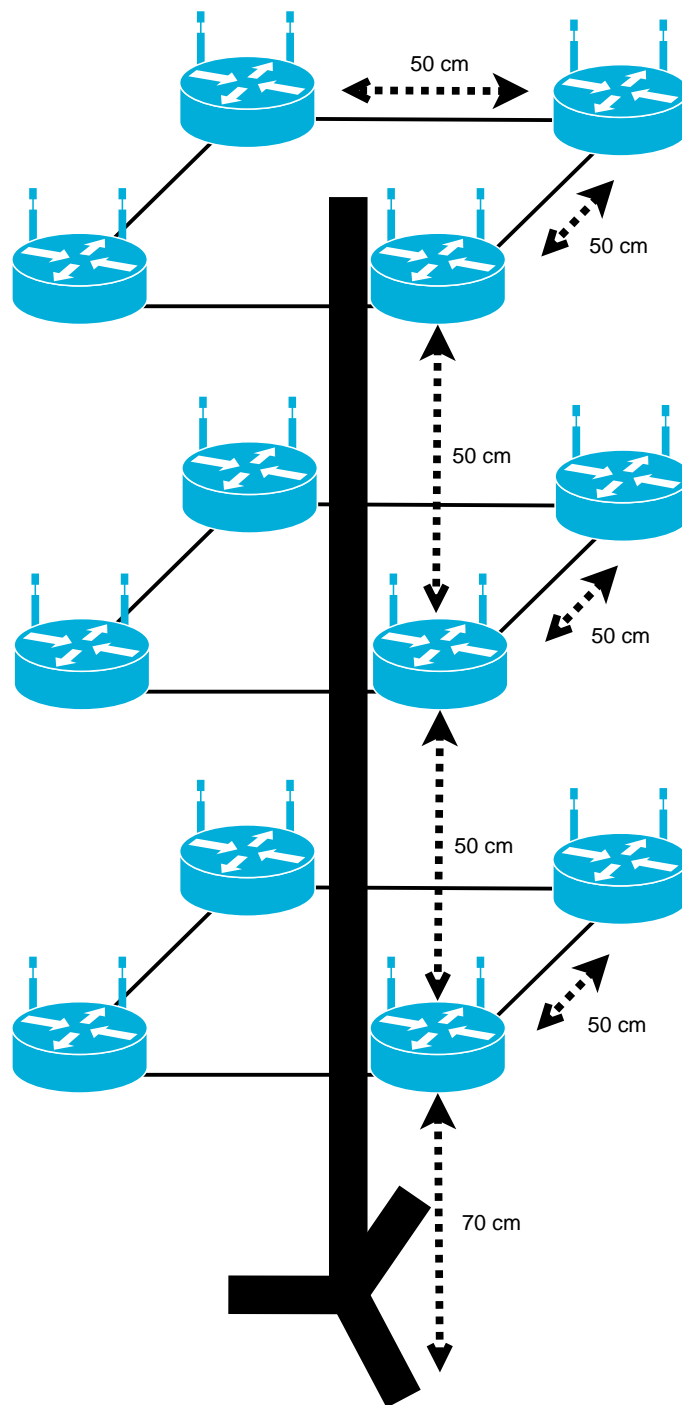


Figura 8.12: Topologia complexa

8.3 Experimentos de Troca de Canal

Usando o cinaps-1, foi executado um teste preliminar para avaliar qualitativamente¹ o tempo de troca de canal e a perdas durante a troca. Nos experimentos, os três APs estavam posicionados de forma empilhada (topologia *stack-like*), com 48 cm de espaço, e usando os canais adjacentes 36, 40 e 44 (APs operando no Modo 6, com 6 dB de atenuação na Ptx).

Basicamente, o experimento consistiu de execuções da ferramenta WiAssess cliente (responsável pelo envio do fluxo) executando no cinaps-0 e WiAssess servidor (responsável pelo recebimento do fluxo) no cinaps-1 (configurado inicialmente no canal 36), com duração de 60 segundos, taxa de 30 Mbps e tamanho do pacote de 1024 bytes. Paralelamente, no momento em que foi disparado o WiAssess cliente, foi disparado um *bash script* com os seguintes comandos:

```
#!/bin/bash
#AP1 (Canal 36)
#iwconfig ath0 ap 00:18:6E:18:A5:00
sleep 20
#AP2 (Canal 40)
iwconfig ath0 ap 00:18:6E:17:44:C0
sleep 20
#AP3 (Canal 44)
iwconfig ath0 ap 00:18:6E:18:B6:C0
```

Além disso, também foi executada a ferramenta iwevent [87] para capturar os eventos da interface. Os resultados obtidos foram os seguintes:

```
[root@cinaps-1 ~]# iwevent
Waiting for Wireless Events from interfaces...
18:52:26.525209 ath0 New Access Point/Cell address:Not-Associated
18:52:27.207948 ath0 Scan request completed
18:52:27.212343 ath0 New Access Point/Cell address:00:18:6E:17:44:C0
18:52:46.525990 ath0 New Access Point/Cell address:Not-Associated
18:52:46.527522 ath0 New Access Point/Cell address:00:18:6E:18:B6:C0
```

Por outro lado, a instância do WiAssess servidor obteve o seguinte resultado:

¹Qualitativamente no sentido de que não foram executados testes com quantidade suficiente de repetições que permitissem concluir quantitativamente; este aspecto também faz parte do conjunto de trabalhos futuros identificados como relevantes.


```
[root@cinaps-1 ~]# ./wiassess -t 60
WiAssess unicast running as server at PORT 10000
1024
Packets = 227963 / 230242 ; Rate = 30395 Kbps
```

Segundo a estatística gerada pela ferramenta, foram recebidos 227963 pacotes de 1024 bytes e o último pacote transmitido com sucesso foi o 230242. Com base neste valores, nota-se que a quantidade de pacotes perdidos – ou PER (*Packet Error Rate*) – com as mudanças de AP foi de 2279, abaixo de 1% do total. Note que o cálculo de pacotes perdidos é aproximado pois assume, por simplificação, que o total de pacotes transmitidos é igual ao identificador (número de seqüência) do último pacote recebido.

Para comparar, uma nova execução de WiAssess cliente/servidor foi realizada, com os mesmos parâmetros, mas com a interface ininterruptamente no canal 36. O resultado foi o seguinte:

```
[root@cinaps-1 ~]# ./wiassess -t 60
WiAssess unicast running as server at PORT 10000
1024
Packets = 230117 / 230135 ; Rate = 30682 Kbps
```

Nesta execução, observou-se que no cenário sem troca de AP apenas 18 pacotes foram perdidos. Portanto, apesar de causar um acréscimo em relação ao cenário sem troca de AP, o aumento na perda de pacotes percebido no cenário com troca de canal se manteve em um patamar gerenciável.

Em relação ao tempo de troca observado no experimento, houve uma variação significativa: 687 ms na primeira troca e apenas 2 ms na segunda. Entretanto, cabe dizer que existem momentos em que a migração de canal demora um tempo significativamente superior. Por exemplo, no caso abaixo foi executada a ferramenta iwconfig [87] para que a interface fosse associada ao AP1 (00:18:6E:18:A5:00).

```
19:08:45.190200 ath0 Scan request completed
19:08:50.195909 ath0 New Access Point/Cell address:00:18:6E:18:A5:00
```

Ao invés de simplesmente se associar a este AP, o *driver* executou um novo escaneamento e só finalizou a associação depois de aproximadamente cinco segundos.

8.4 Considerações Finais

Os resultados apresentados neste capítulo, baseados em experimentos práticos realizados com a ferramenta WiAssess de emulação de tráfego, demonstraram que é factível o uso de *clusters* de APs co-localizados e reforçam grande parte das premissas anteriores, com pequenas variações quantitativas em relação aos valores relatados na literatura (vazão efetiva medida de aproximadamente 30 Mbps para o Modo 8, 24 Mbps para o Modo 6 e 14 Mbps para o Modo 4, significativamente superiores aos da literatura – 21, 16 e 10 Mbps, respectivamente –, usados nos testes simulados dos capítulos anteriores).

Foi mostrado também que o efeito da interferência entre canais adjacentes (*Adjacent Channel Interference* - ACI) – causado pela máscara de espectro do 802.11a/g – aparece de fato em ambientes onde canais adjacentes são usados em uma mesma área, com grande proximidade entre os dispositivos transmissores e sem canais de separação. Contudo, os experimentos com diversas combinações de parâmetros de potência e de modo de transmissão dos APs co-localizados mostraram na prática que uma redução de 6 dB na potência de transmissão foi suficiente para eliminar o efeito do ACI no Modo 6, permitindo a transmissão com a máxima vazão efetiva deste modo (24 Mbps) usando simultaneamente canais adjacentes. Já para o Modo 8, foi necessário reduzir em 9 dB pra obter o mesmo resultado. O efeito colateral desta diminuição da potência de transmissão em relação ao seu valor original (para 1/4 de 18 dBm no Modo 6 e para 1/8 de 16 dBm no Modo 8) causa, teoricamente, uma redução do alcance efetivo do Modo 6 para a metade do seu valor normal (e ainda maior para o Modo 8), considerando a fórmula de “*Free Space Path Loss*” [39]. Além disso, os experimentos envolvendo reassociação mostraram qualitativamente que o *overhead* de mudança de canal variou de apenas 2 ms até 5006 ms. Mesmo no pior caso, é pouco significativo em relação a duração dos vídeos considerados nos estudos. Além disso, só impactaria nos casos em que a requisição é atendida imediatamente.

Em resumo, as principais contribuições deste capítulo são:

1. Estudo prático do tráfego emulado de um sistema SWVoD baseado em APs co-localizados em um ambiente de testes real *indoor*;
2. Avaliação quantitativa da vazão efetiva dos três modos de maior vazão do 802.11a, sem a utilização de canais adjacentes;
3. Investigação do impacto da interferência entre canais adjacentes (ACI) na vazão efetiva, com e sem canal de separação;

4. Comprovação da eficácia do ajuste de potência de transmissão para eliminação da ACI nos casos sem canal de separação, dependendo da distância entre os APs;
5. Verificação qualitativa da latência de chaveamento entre canais.

No capítulo seguinte é feita uma reflexão crítica sobre as questões relevantes relacionadas ao que foi proposto e avaliado no presente capítulo e nos anteriores, objetivando a identificação de pontos fortes da tese e outros que merecem mais estudos.

Capítulo 9

Discussão

Este capítulo tem por objetivo discutir questões relevantes relacionadas às propostas e avaliações realizadas nos Capítulos 3 a 8, buscando indícios que permitam generalizar os resultados obtidos para outros cenários.

Analisando as propostas em seqüência, nota-se que inicialmente foi investigado um cenário simples mas representativo para mostrar o potencial de escalabilidade do sistema SWVoD básico proposto para vídeos curtos, sem a pretensão de cobrir todos os testes necessários para provar a aplicabilidade prática da proposta. A partir deste pressuposto, novos experimentos seriam interessantes para aumentar ainda mais o entendimento sobre o desempenho quantitativo do sistema básico em cenários mais complexos.

Dois questões importantes podem ser citadas como exemplos: o impacto de conjuntos heterogêneos de vídeos com diferentes durações e taxas, assim como a influência dos usuários voláteis. Entretanto, os resultados apresentados podem ser usados para análises de pior caso, devido a alta taxa de vídeo empregada (1 Mbps) para diferentes durações de vídeo. Por exemplo, em cenários onde forem empregados conjuntos heterogêneos de vídeos com até 360 segundos de duração e diferentes taxas de vídeo com até 1 Mbps de taxa, os resultados refletem um *upper bound* para a taxa de bloqueio. Além disso, se os usuários voláteis tivessem sido modelados no sistema (incluindo um mecanismo de *heart-beat* simples no protocolo de sinalização), a taxa de bloqueio obtida tenderia a ser ainda menor já que os usuário voláteis ocupariam a largura de banda por menos tempo que usuários convencionais, ou seja, liberariam os recursos alocados mais rapidamente, permitindo uma redução na latência de serviço de outras requisições que estivessem aguardando na lista de liberação.

Como o protocolo de sinalização adotado é bastante simples (poucos pacotes precisam ser enviados entre os componentes do sistema por requisição de vídeo), mesmo no caso de

uma grande audiência, o WCM não tende a ser sobrecarregado. Contudo, tanto o WCM quanto o servidor e o *switch* podem ser pontos centrais de falha. Logo, um projeto que demande alta disponibilidade deverá agregar estratégias de tolerância a falhas em todos estes três componentes.

Conforme mostrado, o sistema básico proposto é ineficiente em cenários onde vídeos de longa duração precisam ser transmitidos. Em virtude disso, foi proposto um novo sistema – o CINAPS – com a introdução de heurísticas focadas na aplicação – ERF e BERF – que permitiram aumentar a eficiência do sistema SWVoD com APs co-localizados nestes casos, explorando com sucesso a tolerância dos usuários em relação a latência de serviço normalmente assumida em aplicações VoD, característica conhecida como “Fator de Paciência” (*Patience Factor* - PF).

Particularmente em relação ao PF, embora os valores usados nas simulações pareçam, a primeira vista, demasiadamente altos, não significa necessariamente que os usuários sejam excessivamente pacientes. A razão por trás disto é que a latência de serviço, usando BERF com PF igual a metade da duração do vídeo, é no máximo igual a latência média obtida com um esquema básico de *broadcast* periódico [30] (considerando o caso em que o número de canais é limitado e apenas um canal é escalonado para cada vídeo transmitido continuamente), que era considerado o estado-da-arte para sistemas VoD escaláveis até recentemente. Todavia, os resultados sugerem que, com a incorporação de técnicas de reuso de fluxo em cenários onde exista concentração de acesso em vídeos populares, pode-se atingir uma redução significativa na latência de serviço sem sacrificar a taxa de bloqueio, tornando viável a construção de sistemas TVoD mais efetivos com latência próxima de zero.

Outro ponto importante é que nos experimentos foram modelados cenários onde as requisições seguem um processo de Poisson. Note que, conforme resultados práticos coletados a partir de um sistema VoD de grande escala, instalado na China Telecom, é sugerido [92] que qualquer modelo de simulação de sistemas VoD baseados em uma distribuição de Poisson resulta em um sistema superdimensionado. Independentemente disso, especula-se que, na prática, o comportamento dos usuários siga uma combinação de processos de Poisson, variando de acordo com o período do dia, do dia da semana, e etc. Por exemplo, para uma modelagem realística do caso da praça de alimentação de *shopping center* exposto no Capítulo 1, seria necessário modelar os períodos equivalentes ao horário de almoço e jantar como processos de Poisson com alta taxa de chegada, enquanto que nos demais períodos o perfil de requisições seria equivalente a diferentes processos de

Poisson com taxas mais baixas, tal que quanto mais distante dos horários de pico, menor seria o λ . Além disso, a modelagem precisaria capturar o fato de que o movimento nos *shoppings* aumenta no final de semana e em períodos próximos a datas especiais (natal, por exemplo). De qualquer forma, os resultados obtidos nos experimentos realizados continuam sendo relevantes para análise de pior caso em cenários complexos como o exposto, desde que a mais alta taxa de chegada esperada seja de até 120 requisições por minuto.

No que se refere ao estudo sobre redução de consumo de energia, embora a análise tenha sido realizada no contexto do CINAPS, cabe salientar que as técnicas não se restringem a arquiteturas com pontos de acesso co-localizados. Em particular, a técnica *delayed reassociation* será eficaz em qualquer sistema onde a latência de serviço seja significativa (algo que ocorre em diversos projetos de sistemas VoD, especialmente nos baseados em técnicas de *broadcast* periódico). Por outro lado, a técnica *bursty transmission* será útil em aplicações onde as fontes de tráfego possam ser gerenciadas globalmente, o que é uma constante em sistemas VoD, sejam eles para LANs ou WANs, cabeadas ou sem fio.

Os resultados foram obtidos com base no uso do modo *Sleep* de baixo consumo. Caso o modo *Off* fosse adotado em substituição ao modo *Sleep*, é esperado que o *overhead* de transição de *Off* para *Idle* ($T_{switch_{off}}$) seja significativamente superior ao de *Sleep* para *Idle* ($T_{switch_{sleep}} = 250 \mu s$), podendo inclusive envolver re-associação ao AP a cada chaveamento, o que tende a inviabilizar a sua utilização na técnica *bursty transmission*, que atua no período *after scheduled* definido anteriormente. Contudo, o modo *Off* poderia ser viável na técnica *delayed reassociation*, que está relacionada ao período equivalente a latência de serviço. Neste caso, assumindo por simplicidade que o uso deste modo implicaria em P_{BS} próxima a zero (na verdade o correto seria $P_{idle} * 2 * T_{switch_{off}}$), mas que de qualquer forma é um valor muito baixo), o consumo médio de energia para vídeos de 1200 s cairia para aproximadamente 1588 Joules no Nível 1 de otimização e para 264 Joules no Nível 3. Isso representaria reduções de, respectivamente, 14,5% e 85,8% (anteriormente eram de 12,6% e 84%) em relação ao consumo no modo sem otimizações (Nível 0).

Outro ponto importante é que, assim como diversos outros trabalhos presentes na literatura, na concepção dos modelos utilizados nos Capítulos 3, 4 e 5, optou-se por não considerar a diferença de distância entre clientes e APs. Já que esta variável impacta significativamente a vazão efetiva obtida em cada AP, os capítulos seguintes passaram a incorporá-la, assumindo a existência de um mecanismo de localização capaz de fornecer

a informação de distância. A partir desta informação, o WCM aceita a requisição se o cliente está na área de alcance efetivo do modo de transmissão configurado no AP. A premissa do mecanismo de localização pode ser substituída por um outro mecanismo de *probe* em nível de aplicação, usado para testar se o cliente consegue receber com sucesso a transmissão no modo configurado. Ou seja, para implementar a heurística DBERF não é fundamental saber o posicionamento exato do cliente.

Apesar dos resultados apresentados para o CINAPS consciente da distância serem relevantes por si só, estes abrem espaço para discussão de um problema não trivial: como utilizar na prática a abordagem adaptativa continua sendo uma questão em aberto. Uma estratégia para tentar resolver este problema seria criar um mecanismo de *feedback* que acompanhe o perfil de requisições e, de tempos em tempos, altere o modo de transmissão de acordo com esta informação.

Em relação ao esquema GAPS, a questão do posicionamento volta a ser relevante. Apesar da posição exata não ser necessária, um mecanismo capaz de identificar o *cluster* mais próximo (facilmente implementado através da comparação das informações de RSSI recebidas de um ou mais *clusters*) precisa ser usado em conjunto com o mecanismo de *probe* discutido acima, representando uma alternativa à premissa do mecanismo de localização. Além disso, no esquema GAPS dinâmico surge a necessidade de se implementar um mecanismo adicional capaz de controlar o estado dos APs (*active/stand-by*). Uma possibilidade interessante é aproveitar a funcionalidade *Power over Ethernet* (PoE) dos *switches* atuais. O PoE permite que os APs recebam energia pelo próprio cabo *Ethernet* com o qual se conecta ao *switch*. Assumindo que o *switch* pode ser gerenciado remotamente, seria possível criar um procedimento para ligar/desligar uma porta específica e, como consequência, o AP fisicamente conectado àquela porta.

Por último, mas não menos importante, devido ao modelo simplificado usado na ferramenta TCHE (Apêndice A) empregada nos experimentos simulados (de fato, ferramentas de simulação de redes sem fio em geral são incapazes de refletir aspectos importantes da realidade [9]), mostrou-se relevante a implementação da ferramenta WiAssess (Apêndice B) de emulação de tráfego para que fossem realizados experimentos em ambientes reais, gerando tráfego com características similares ao de um protótipo real. Como os experimentos ficaram restritos a um ambiente fechado (Figura 8.1, com área limitada (14x14 m²) e composto por vários obstáculos, os resultados obtidos foram suficientes apenas para validar parte das premissas (uso de APs co-localizados em canais adjacentes, vazão efetiva do canal para diferentes modos de transmissão e *overhead* de tempo de chaveamento

de canal) mas não permitiram a avaliação do alcance efetivo, que depende de uma área mais ampla. Além disso, os experimentos práticos concentraram-se em equipamentos IEEE 802.11a/b/g (WNICs PCI e APs) de um mesmo fabricante (3COM), de modo que os resultados quantitativos apresentados podem não ser os mesmos em ambientes heterogêneos.

Outro ponto importante é que, devido a existência de um número reduzido de WNICs PCI disponíveis, optou-se por usar nos experimentos uma máquina associada por AP, tal que em cada uma delas foi emulado o comportamento esperado para vários clientes recebendo fluxos UDP com taxa de 1 Mbps através de um mesmo canal, ou seja, pelo mesmo AP. Espera-se que o comportamento com múltiplos clientes reais por AP seja muito próximo, já que, basicamente, a tarefa do cliente se resume ao recebimento dos pacotes UDP (o que envolve envio de ACKs na camada MAC, implementada no *firmware* da WNIC) enviados pelo servidor de maneira escalonada no tempo, isto é, sem rajadas, para cada um dos clientes, de modo que não é esperado que ocorra contenção no acesso ao meio.

Em particular, cabe discutir com mais detalhes os resultados obtidos através dos experimentos práticos com os da literatura, usados nas simulações. A Figura 9.1, extraída de [55], apresenta, dentre outras informações, a distância máxima com que são capazes de operar os dois modos de maior vazão efetiva na camada de aplicação: 21 Mbps / 30 m para o Modo 8 e 16 Mbps / 60 m para o Modo 6. Segundo a especificação do padrão IEEE 802.11a [34], a sensibilidade mínima de recepção destes modos deve ser de -65 dBm e -70 dBm, respectivamente, valores estes que estão de acordo com o *datasheet* das interfaces 802.11a/b/g usadas nos testes [1]: -70 dBm e -78 dBm. Assim, no pior caso (usando o valor de sensibilidade estabelecido no padrão e os alcances divulgados em [55]) pode-se assumir que a transmissão para um receptor posicionado a 60 metros de distância do transmissor usando o Modo 6 só é possível se a potência de transmissão (Ptx) usada nos APs for tal que o receptor receba o sinal com pelo menos a potência mínima de recepção (Prx) igual a -70 dBm. Aplicando a fórmula de *Free Space Path Loss* com este nível de Prx, e Ptx reduzida em 6 dB (caso em que ACI torna-se insignificante), conclui-se que a distância máxima seria próxima a 30 m. Isto porque, em via de regra, a fórmula mostra que uma redução para um quarto na Ptx (6 dB) faz com que a distância alcançada com a mesma Prx caia para a metade.

Como os resultados empíricos concentrados no Modo 6 mostraram que, na prática, é possível atingir vazão efetiva em torno de 24 Mbps (com mecanismo de RTS/CTS desa-

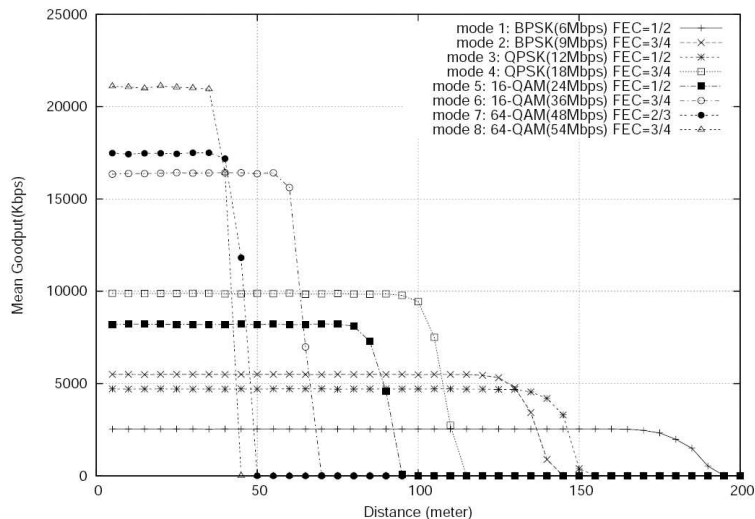


Figura 9.1: Vazão efetiva de diferentes modos do 802.11a em função da distância

bilitado) e não apenas 16 Mbps conforme reportado na literatura, pode-se argumentar que o impacto da redução de 6 dB em P_{tx} , suficiente para eliminar a ACI nos experimentos com três APs operando em canais adjacentes (sem separação), continua validando grande parte dos experimentos simulados [55]. Isto porque o Modo 6, com o alcance reduzido para 30 m por operar com um quarto de P_{tx} , proporciona uma vazão superior a assumida para o Modo 8 (21 Mbps / 30 m). Enquanto isso, em relação ao Modo 8 foi mostrado que a redução na potência precisou ser ainda maior para eliminar a ACI (9 dB), provavelmente causada pelo fato deste modo operar com uma menor sensibilidade mínima de recepção. Com isso, o alcance efetivo do Modo 8 explorando pontos de acesso co-localizados operando sem canais de separação tende a ser próximo a 10 metros, o que tende a restringir significativamente a sua aplicabilidade prática.

9.1 Considerações Finais

Para concluir a discussão desta tese, cabe salientar que, de maneira geral, o ganho de desempenho que pode ser obtido melhorando uma determinada porção de um sistema computacional pode ser calculado através da Lei de Amdahl [59]. Em particular, esta lei define a aceleração (*speedup*) que pode ser obtida com o melhoramento de uma determinada parte do sistema, através da seguinte equação:

$$speedup = \frac{\text{desempenho usando o melhoramento}}{\text{desempenho sem o melhoramento}} \quad (9.1)$$

No contexto de *clusters* de computadores usados para executar programas paralelos,

o tempo de execução (*execution time*) é normalmente usado como principal métrica de desempenho e o melhoramento considerado corresponde ao acréscimo de processadores (ou nós de computação). Neste caso, é usada a fórmula alternativa de *speedup*:

$$speedup = \frac{execution\ time\ sem\ o\ melhoramento}{execution\ time\ com\ o\ melhoramento} \quad (9.2)$$

De forma complementar, a eficiência (*efficiency*) do sistema pode ser calculada como segue:

$$efficiency = \frac{speedup}{processadores} \quad (9.3)$$

Nos casos em que o *speedup* cresce linearmente com a incorporação de processadores/nós de computação, o desempenho do sistema é considerado de escalabilidade linear e 100% eficiente (eficiência = 1). Caso a inclusão de nós gere um aumento no *speedup* superior ao linear, o desempenho é denominado superlinear. Quando este é inferior ao linear, ainda assim o desempenho do sistema é considerado escalável, porém sublinear. Por outro lado, quando a inserção de nós chega ao ponto em que passa a causar diminuição no *speedup*, é dito que o sistema teve uma desaceleração (*slowdown*), ou seja, chegou ao seu limite de escalabilidade.

De maneira análoga, este conceito pode ser levado para o problema abordado nesta tese, usando a taxa de bloqueio como principal métrica de desempenho. Conforme visto nos experimentos realizados, o sistema básico proposto de SWVoD baseado em APs co-localizados mostrou uma escalabilidade linear até o número máximo de canais não sobrepostos suportado pelos padrões 802.11a/g. Ou seja, o desempenho usando os recursos extras de largura de banda incorporados a cada duplicação do número de APs, permitiu que o sistema duplicasse a sua capacidade de atendimento de requisições. Por exemplo, ao duplicar o número de APs, foi capaz de atender, com a mesma taxa de bloqueio, o dobro de requisições por minuto ou, de forma equivalente, vídeos com o dobro da duração. Em particular, no sistema CINAPS com a heurística BERF, o *speedup* foi inclusive superlinear, já que foi capaz de usar mais eficientemente uma quantidade crescente de largura de banda agregada, superando o desempenho da heurística LLF+ usada no sistema básico.

Portanto, de acordo com este embasamento teórico sobre avaliação de desempenho e com os pontos discutidos ao longo deste capítulo acerca dos resultados obtidos através de experimentos simulados e práticos, é correto afirmar que a hipótese base desta tese é verdadeira, isto é, os sistemas SWVoD propostos – baseados no uso de APs co-localizados

em conjunto com os mecanismos e políticas de gerenciamento de recursos introduzidos – são, de fato, soluções escaláveis eficientes para os cenários avaliados.

No próximo capítulo são brevemente caracterizados trabalhos encontrados na literatura relacionados a diversos aspectos abordados nesta tese, os quais, quando factível, são contrastados com as soluções propostas neste estudo.

Capítulo 10

Trabalhos Relacionados

Este capítulo visa relacionar esta tese com outros trabalhos relevantes encontrados na literatura, divididos em duas áreas: uma específica – sistemas VoD para WLAN – e outra geral – redes sem fio.

10.1 Sistemas VoD para WLAN

Embora existam alguns trabalhos de pesquisa que tratem o problema de sistemas VoD para WLANs, o levantamento bibliográfico realizado no decorrer deste trabalho de tese não apontou para nenhum trabalho com abordagem semelhante a empregada nesta tese. Dos sistemas de transmissão de vídeo encontrados, foram escolhidos o MobiVoD [88] e WiVision [20] para uma breve análise comparativa em relação as soluções propostas presentes nesta tese.

O MobiVoD é um projeto de sistema VoD para clientes móveis em redes *ad hoc*, o qual emprega a técnica de *broadcast* periódico para aumentar a escalabilidade de vídeos populares. Em contraste com os diferentes sistemas SWVoD propostos nesta tese, MobiVoD não explora a largura de banda agregada de APs co-localizados, e sua avaliação se restringe a resultados para apenas um vídeo (melhor caso para esquemas baseados em *broadcast* e *multicast*).

Por outro lado, o WiVision se diferencia por ser um sistema que suporta tanto distribuição de vídeo ao vivo quanto sob demanda sobre WLANs localizadas na “última milha” (*last-mile*). Embora o trabalho que descreve o WiVision ofereça resultados práticos do sistema para redes 802.11b com múltiplos APs, os autores assumem um serviço de melhor esforço e mostram os erros que ocorrem em diferentes situações. Ao contrário do WiVision, os sistemas propostos nesta tese oferecem garantias de QoS mínimas através de reserva de recursos.

10.2 Redes sem Fio

Apesar de serem parcialmente relacionados com o tema desta tese, diversos estudos realizados com o objetivo de controlar e otimizar o uso da largura de banda oferecida em WLANs merecem ser citados. Nesta seção, são descritos sucintamente esses trabalhos, divididos nas seguintes categorias: controle de associação, sincronização de APs, agregação de canais, redes *mesh*, consumo de energia, ajuste de modos de transmissão e interferência entre canais adjacentes.

10.2.1 Controle de Associação

Diversos trabalhos tratam do problema do controle de associação de clientes quando estes entram na área de cobertura de múltiplos APs, tendo como foco balanceamento de carga (objetivando uma utilização homogênea da largura de banda dos APs) e justiça (visando oferecer a mesma qualidade de serviço para todos os usuários).

Por exemplo, o trabalho em [73] defende o uso de esquemas que considerem a carga dos APs no momento da associação, otimizando o uso da rede. Além disso, sugere a necessidade de existirem mecanismos que ofereçam suporte à reassociação de clientes a APs quando é detectado desbalanceamento. Já em [80] é proposto um algoritmo de balanceamento de carga dinâmico, chamado DLBA, que controla a associação de clientes aos APs de modo que o valor médio de RSSI seja maximizado e a variância deste RSSI e do total de clientes por AP seja minimizado. Seus resultados de simulação, considerando que todos os clientes têm o mesmo perfil de tráfego, mostram que o DLBA é capaz de distribuir com justiça os clientes pelos APs. Por outro lado, [46] considera as condições dos canais no processo de associação, implicitamente providas pelo padrão 802.11h¹. Os resultados de simulação do esquema mostram sua superioridade em relação a heurística básica SSF descrita na seção anterior, adotada pelo 802.11, especialmente quando existe interferência externa.

Em particular, o trabalho [14] mostrou que o desempenho de seu esquema focado em justiça supera as heurísticas SSF e LLF descritas anteriormente e que, através do balanceamento de carga nos APs, a vazão total da rede também pôde ser aumentada².

¹Padrão criado para atender os aspectos regulatórios do Comitê Europeu de Radiocomunicações no que se refere a banda de 5 GHz.

²Embora este trabalho não tenha estudado o comportamento do sistema focando nas necessidades da aplicação, ajudou a entender melhor o problema do controle de associação e inspirou a idéia da sua aplicação ao contexto de VoD.

10.2.2 Sincronização de APs

Além da abordagem descrita acima, alguns trabalhos encontrados na literatura se caracterizam por propor o uso de sincronização entre múltiplos APs para atingir maiores níveis de QoS.

Em [21] é proposto um protocolo adaptativo para sincronizar múltiplos APs com PCF e DCF habilitados, de modo que a fatia de tempo reservada para cada um dos modos, respectivamente CFP (*Contention Free Period*) e CP (*Contention Period*) possa variar dinamicamente de acordo com as características do tráfego.

Por outro lado, o MiFi [13] realiza a coordenação centralizada de múltiplos APs, fazendo com que o CFP dos APs seja sincronizado, evitando interferência³ com o intuito de garantir QoS.

10.2.3 Agregação de Canais

Outra idéia que vem sendo objeto de vários trabalhos que visam a aumentar a vazão em WLAN é a agregação de canais. Como exemplo, [53] propõe um esquema onde estações capazes de operar em múltiplos canais simultaneamente (multi-canal) podem agrupar canais para aumentar a sua própria vazão, sem inviabilizar a utilização, na mesma rede, de estações padrões que suportam apenas um canal.

Além das iniciativas acadêmicas, diversos fabricantes de equipamentos WLAN já oferecem soluções proprietárias e não interoperáveis de agregação de canais em seus produtos (ex. *turbo mode* da 3COM). Embora a agregação de canais aumente efetivamente a vazão por canal, implica em reduzir o número de canais não sobrepostos de modo que a vazão agregada não é afetada significativamente. Outras iniciativas interessantes são o 802.11F [36] da IEEE, que foi uma tentativa de definir um protocolo para interoperabilidade entre APs (*Inter-Access Point Protocol - IAPP*), cujo documento foi cancelado em 2006, e o grupo de trabalho em andamento formado pela IEFT, conhecido como CAP-WAP (*Control And Provisioning of Wireless Access Points*), que também objetiva prover especificações para aumentar a interoperabilidade entre APs. Por fim, resta mencionar que a IEEE está trabalhando no padrão 802.11n (atualmente em versão *draft*) com o intuito de oferecer maior vazão efetiva através de esquemas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*).

³Problema conhecido como “*overlapping cell problem*” que pode ocorrer em redes com múltiplos APs operando no modo PCF, onde transmissões em células adjacentes podem causar interferência durante o período CFP.

10.2.4 Redes *Mesh*

No que se refere a aumento de vazão, outra área de estudo que tem recebido crescente atenção é a de redes *ad hoc* organizadas como *meshes*⁴. Em particular, trabalhos que exploram múltiplos canais [74] e/ou múltiplas interfaces [93] merecem destaque. Em [4] é apresentada uma visão geral sobre as questões mais relevantes relacionadas a utilização de redes *mesh*.

10.2.5 Consumo de Energia

Apesar de não existirem outros trabalhos que explorem o uso de APs co-localizados para a construção de sistemas VoD escaláveis para dispositivos móveis, vários trabalhos atacam a questão do consumo de energia em aplicações de *streaming* de vídeo. Em particular, [17] foi o primeiro a propor a utilização de *burst* para reduzir o consumo nas interfaces 802.11, através do modo *sleep*. Além da proposta, é demonstrado que a WNIC permanece ociosa durante mais de 56% do tempo, mesmo com fluxos de 2 Mbps, e que o modo de economia de energia do 802.11 é ineficiente para fluxos com taxa superior a 56 Kbps. Apresenta também um estudo sobre o impacto de técnicas de redução de consumo em WNICs para diferentes formatos de *streaming* em estratégias baseadas no servidor (através de controle de tráfego) ou no cliente (através de previsão de intervalos ociosos).

Em um trabalho posterior [89], é mostrado que estratégias baseadas no cliente que utilizam previsão linear alcançam melhores resultados em relação a abordagem inicial, que considerava apenas a média. No entanto, [47] argumenta que o uso de *burst* pode aumentar o congestionamento, propondo como solução a adoção de um esquema adaptativo com tamanho de *burst* variável. Por outro lado, [6] defende o uso de políticas de escalonamento e gerenciamento de *buffers* que exploram o modo *off*. Outra estratégia para redução de consumo é a aplicação de *transcoding* para diminuir o tempo em que a WNIC permanece em modo *receive*, empregada em trabalhos como [58] e [84].

10.2.6 Ajuste de Modo de Transmissão

O padrão IEEE 802.11 [33] e seus suplementos não especificam um algoritmo para seleção de modo de transmissão. Em geral, os fabricantes de equipamentos 802.11 implementam esquemas proprietários para a seleção, normalmente baseados em informações

⁴Onde dispositivos com função de roteamento, semelhante a exercida pelos APs (podendo ou não funcionar como *gateways* para redes cabeadas), são interligados por *links* sem fio. Além disso, se diferencia de redes *ad hoc* convencionais porque a variação na sua topologia é significativamente menos frequente.

estatísticas (perda de pacotes, latência, entre outras). Por outro lado, diversos trabalhos acadêmicos estudaram soluções baseadas na intensidade do sinal recebido pelas estações (RSSI) para determinar as condições do canal e então empreender decisões de escolha de modo de transmissão.

O trabalho [29] foi um dos precursores neste tipo de pesquisa ao propor o mecanismo de escolha automática de modo de transmissão denominado RBAR (*Receiver-Based AutoRate*), voltado para o padrão 802.11b. Em trabalho posterior [55], foi avaliada por simulação a vazão efetiva dos diferentes modos do 802.11a, além de ter sido analisada a eficiência dos mecanismos de RBAR e de uma extensão deste, denominado P-RBAR (*Predictive RBAR*).

Por outro lado, foi mostrado em [27] que um esquema de escolha inteiramente baseado em RSSI sofre de imperfeições que impactam negativamente em aplicações de *streaming*. Como solução, foi proposto e avaliado empiricamente um esquema híbrido que utilizou tanto informações estatísticas como a intensidade do sinal medida, capaz de adequar-se mais rapidamente a variações nas condições do canal em relação ao esquema puramente baseado em estatísticas, ao mesmo tempo em que contornou as imprecisões obtidas com o esquema inteiramente baseado em RSSI. Entretanto, estes dois últimos trabalhos apresentaram resultados restritos à um único fluxo entre apenas duas estações, não contemplando a anomalia [28] que surge em cenários com múltiplos clientes operando no mesmo canal.

10.2.7 Interferência entre Canais Adjacentes

Trabalhos recentes quantificaram empiricamente o efeito da interferência entre canais adjacentes (*Adjacent Channel Interference* - ACI), com e sem sobreposição de frequência entre canais vizinhos. Em [57] é demonstrado, através de um modelo de interferência construído com base em experimentos práticos realizados com 802.11b, que o uso de canais parcialmente sobrepostos pode levar a uma utilização mais efetiva do espectro e a um melhor desempenho para as aplicações. Apesar de relevante, com aplicações em esquemas de seleção de canais em WLANs infra-estruturadas e em *meshes*, não modela corretamente o efeito da interferência entre canais não sobrepostos com modulação OFDM – caso dos canais do 802.11a e de parte do 802.11g – já que considera a energia nos pontos de sobreposição baixa o suficiente para ser desprezível. Tanto em [18], quanto em [10], foi mostrado através de resultados práticos que a interferência entre canais vizinhos não sobrepostos pode causar uma degradação significativa na vazão efetiva dos canais. Em particular, o primeiro trabalho salientou que uma das formas efetivas de contornar o

efeito da ACI é o uso de controle de potência. No segundo, foi sugerido que a queda na vazão ocorre pelo impacto da ACI no mecanismo de CCA (*Clear Channel Assessment*), onde causa “falsos negativos”.

10.3 Considerações Finais

Analisando o conjunto de propostas desta tese em relação aos trabalhos relacionados a VoD discutidos neste capítulo, cabe ressaltar que esta tese se diferencia dos demais estudos encontrados na literatura por apresentar soluções escaláveis eficientes para projetos de VoD em redes sem fio, otimizados para cenários com alta densidade de clientes, com ou sem concentração de acesso em parte do acervo. Em relação aos demais trabalhos mencionados, pode-se dizer que está diretamente relacionada ao problema do controle de associação, porém representa uma nova abordagem, focada na aplicação. Além disso, nas propostas desta tese não é preciso adotar estratégias de sincronização de APs como as descritas pois elas só são necessárias quando usados múltiplos APs operando com PCF e diferentes classes de tráfego (as propostas desta tese utilizam apenas DCF e assumem a existência de uma única classe de tráfego). Já a estratégia de aumento de vazão por agregação de canais não se mostra necessária para transmissão de fluxos de vídeo em WLAN dado que fluxos unitários não excedem a capacidade de um canal. Embora as propostas desta tese tenham sido concebidas para uso em WLANs infra-estruturadas, mostra-se factível empregar grande parte das soluções propostas para a criação de um projeto otimizado para o contexto de redes *mesh*, o qual acredita-se que representa um novo paradigma com forte tendência em redes sem fio.

Cabe salientar que os trabalhos descritos envolvendo estudos de consumo de energia não consideram a potencial economia decorrente da latência de serviço, analisada dentre as propostas desta tese em conjunto com o uso de *burst*. Já no caso de trabalhos de ajuste de modo de transmissão, a solução proposta na tese resolve de forma simples o problema da anomalia mencionado, equivocadamente desprezado em vários trabalhos. Por fim, trabalhos recentes têm tratado o problema da interferência no gerenciamento de redes sem fio, seja esta co-canal ou proveniente de canais adjacentes parcialmente sobrepostos em frequência e não sobrepostos. No presente trabalho foi confirmado, através de experimentos práticos, que a ACI é de fato um limitante para esquemas com pontos de acesso co-localizados. Entretanto, constatou-se que, com um correto gerenciamento da potência de transmissão dos APs, pode-se reduzir a interferência entre canais adjacentes não so-

brepostos em frequência para valores que viabilizam a comunicação com máxima vazão efetiva.

Capítulo 11

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões decorrentes deste trabalho de tese, bem como os trabalhos futuros identificados como relevantes.

11.1 Conclusões

Em caráter geral, a partir desta tese pode-se concluir que a hipótese base enunciada na introdução é verdadeira, ou seja, o emprego de aglomerados (*clusters*) de pontos de acesso co-localizados operando em canais sem sobreposição, aliado a mecanismos e políticas que permitiram um uso eficiente dos recursos proporcionados pelos APs, é uma solução escalável efetiva para sistemas de distribuição de mídias contínuas sob demanda em redes sem fio.

A partir das diversas questões relacionadas a esta hipótese tratadas no trabalho, pode-se concluir também que:

- O sistema SWVoD básico proposto, baseado em uma heurística de controle de associação de clientes a APs – *Least Loaded First* (LLF) modificada para garantir largura de banda mínima – genérica, foi capaz de distribuir eficientemente vídeos de curta duração (até 360 s), com latência de serviço próxima de zero, em cenários otimistas onde é assumido que os clientes estão na área de cobertura do *cluster* de APs co-localizados e que a vazão efetiva por canal, na camada de transporte, é próxima ao valor máximo, ligeiramente maior que 30 Mbps, tal que a vazão agregada máxima obtida com 16 APs (13 no 802.11a e 3 no 802.11g) supera 480 Mbps (conforme valores extraídos da literatura [56] e parcialmente confirmados nos experimentos práticos apresentados no Capítulo 8). Estes resultados sugerem que o sistema básico poderia ser uma solução atrativa para várias classes de aplicações de

VoD escaláveis que necessitam de garantias de QoS como trailers de filmes, notícias, videocliques e comerciais, notoriamente de curta duração. Entretanto, além dos resultados terem mostrado que este sistema é ineficiente para vídeos de mais longa duração, as premissas assumidas só seriam válidas em áreas pequenas (cerca de $10 \times 10 \text{ m}^2$), quando usado o modo de transmissão de maior vazão (Modo 8) com a redução de 9 dB na potência de transmissão (Ptx) dos APs necessária para contornar o problema da interferência entre canais adjacentes, explicada em detalhes no Capítulo 8. Por outro lado, os resultados com 8 APs, totalizando uma largura de banda agregada (AB) de 240 Mbps (8 x 30 Mbps), seriam válidos (atendendo uma área de aproximadamente $30 \times 30 \text{ m}^2$, conforme a literatura [55]), respeitando-se um canal de separação (sem necessidade de redução na Ptx). Neste cenário, o sistema poderia atender com sucesso todas as requisições para vídeos de até 360 s de duração, desde que a taxa de chegada não fosse superior a 30 req./min. Outra alternativa, capaz de atender uma área equivalente, porém mais eficiente do ponto de vista de disponibilização de largura de banda, seria a utilização do Modo 6 de transmissão, com redução de 6 dB na Ptx, que permitiria o uso simultâneo dos 16 APs, totalizando uma AB de 384 Mbps (16 x 24 Mbps).

- O sistema CINAPS (*Cluster of INexpensive Access PointS*), o qual introduziu duas novas heurísticas – *Early Released First* (ERF) e *Bounded ERF* (BERF) – focadas na aplicação, foi capaz de reduzir substancialmente a taxa de bloqueio de requisições em comparação com o projeto básico através de um esquema de alocação preguiçosa de canais para atendimento de requisições em momentos de ocupação plena da rede. Entretanto, esta nova abordagem gera como efeito colateral um aumento na latência de serviço, limitado pelo fator de paciência, isto é, pelo tempo máximo que os usuários aceitam esperar entre a requisição e o início do recebimento do vídeo, além de assumir o mesmo cenário otimista descrito acima.
- O sistema *Power-aware* CINAPS estendeu o projeto original do CINAPS para prover suporte a duas técnicas – *delayed reassociation*, proposta nesta tese, e *bursty transmission*, adaptada da literatura – de redução de consumo de energia das interfaces de rede (WNIC) dos dispositivos móveis que, trabalhando de forma combinada, atingiram reduções de até 84% em relação ao CINAPS original, as quais podem ser empregadas em outros sistemas SWVoD conforme discutido no capítulo anterior.

- O sistema *Distance-aware* CINAPS, o qual incorporou ao projeto original do CINAPS uma nova heurística – DBERF – consciente do alcance efetivo dos modos de transmissão do 802.11a e que usa a distância entre clientes e o *cluster* de APs como critério de admissão, teve seu desempenho impactado pelo coeficiente de área descoberta (percentual de área descoberta) apenas nos casos em que o valor deste coeficiente é superior a taxa de bloqueio ideal (obtida desconsiderando a distância). Além disso, foi mostrado que, apesar da abordagem adaptativa de escolha de modo de transmissão ter sido capaz de diminuir a taxa de bloqueio média em pouco mais de 6% em relação a média obtida com o modo de transmissão estático de melhor desempenho médio (Modo 6: alcance = 60 m), em casos pontuais a diferença chegou a valores significativos (mais de 19% para uma área de 200x200 m²). Note que neste caso é considerado um cenário significativamente mais realista do que os anteriores, visto que captura a relação existente entre o tamanho da área e o alcance efetivo dos modos de transmissão, e de certo modo, seus resultados quantitativos configuram-se como um *lower bound* de desempenho porque se baseiam nos valores de vazão efetiva relatados em [55], significativamente inferiores aos obtidos nos experimentos empíricos apresentados no Capítulo 8. Por outro lado, conforme discutido no capítulo anterior, a implementação da abordagem adaptativa não é trivial e, mesmo se implementada de forma eficiente, a diferença entre o seu desempenho e o ideal continuaria sendo expressiva.
- O sistema GAPS (*Grid of collocated Access PointS*), o qual extrapola a proposta do CINAPS de tal forma que múltiplos *clusters* são utilizados para a formação de uma grade de distribuição de VoD onde a quantidade de APs por *cluster* pode ser definida estaticamente ou dinamicamente de acordo com o padrão de concentração do clientes (CCP), foi capaz de reduzir significativamente a taxa de bloqueio de requisições de vídeo em comparação ao *Distance-aware* CINAPS. Também foi mostrado que um esquema dinâmico de escalonamento de APs para os *clusters* é fundamental para que o GAPS opere eficientemente em ambientes em que o CCP pode variar. Por fim, através de novas métricas quantitativas complementares introduzidas neste estudo, foi verificado que o aumento no custo de implantação de esquemas de GAPS dinâmicos é totalmente compensado pelo aumento potencial na receita decorrente do aumento na percentagem de requisições atendidas.
- Os resultados dos experimentos empíricos demonstraram que é factível o uso de

clusters de APs co-localizados e reforçam grande parte das premissas anteriores, com pequenas variações quantitativas em relação aos valores relatados na literatura. Em particular, foi mostrado que o efeito da interferência entre canais adjacentes (*Adjacent Channel Interference* - ACI) – causado pela máscara de espectro do 802.11a/g – aparece de fato em ambientes onde canais adjacentes são usados em uma mesma área, com grande proximidade entre os dispositivos transmissores. Contudo, os experimentos com diversas combinações de parâmetros de potência e de modo de transmissão dos APs co-localizados mostraram na prática que uma redução de 6 dB na potência de transmissão foi suficiente para eliminar o efeito do ACI no Modo 6, permitindo a transmissão com a máxima vazão efetiva deste modo (24 Mbps) usando simultaneamente canais adjacentes. Já para o Modo 8, foi necessário reduzir em 9 dB pra obter o mesmo resultado. O efeito colateral desta diminuição da potência de transmissão em relação ao seu valor original (para 1/4 de 18 dBm no Modo 6 e para 1/8 de 16 dBm no Modo 8) causa uma potencial redução do alcance efetivo do Modo 6 para a metade do seu valor normal (e ainda maior para o Modo 8). Além disso, os experimentos envolvendo reassociação mostraram qualitativamente que o *overhead* de mudança de canal variou de apenas 2 ms até 5006 ms. Mesmo no pior caso, é pouco significativo em relação a duração dos vídeos considerados nos estudos. Além disso, só impactaria nos casos em que a requisição é atendida imediatamente.

11.2 Trabalhos Futuros

A questão principal que ficou em aberto é a incorporação de técnicas de reuso de fluxo nos projetos de sistemas SWVoD propostos, conforme discutido no Capítulo 9. Em particular, como uma das premissas dos projetos propostos é a existência de uma fonte centralizada de tráfego – servidor de vídeo –, permitindo assumir que a quantidade de colisões usando DCF seja insignificante, mostra-se mais indicado adotar técnicas que não firmam essa premissa. Neste caso, um novo projeto capaz de incorporar de forma eficiente a técnica *Patching* (possivelmente em conjunto com *Batching*) se apresenta como um trabalho potencialmente relevante.

Outro objeto de pesquisa importante é a investigação por simulação do desempenho dos projetos propostos para conjuntos heterogêneos de vídeos com diferentes taxas e durações, considerando a presença de usuários voláteis e cobrindo períodos de tempo mais

extensos, onde o efeito do *prime time* possa ser exercitado através de composições de processos de Poisson com taxas diferentes, conforme discutido no capítulo anterior.

Em relação a questão do consumo de energia, seria interessante incorporar e avaliar novos mecanismos que considerem o residual de bateria nos processos de admissão de requisições, sob dois aspectos: (i) pontos de acesso com diferentes taxas de *bursty* (β), incluindo valores menores do que um – que influenciam na latência e nos mecanismos de controle de liberação de canais – e (ii) diferentes versões do mesmo vídeo – onde o cliente só teria sua solicitação aceita se houvesse uma versão do vídeo cuja demanda de energia para recebimento e exibição fosse inferior ao resíduo de carga da bateria do seu dispositivo móvel.

Além destes pontos, existem espaços para a pesquisa de vários mecanismos complementares aos propostos nesta tese, tais como: mecanismo eficiente de tolerância a falhas no WCM (e WCMS) para os casos em que servidores redundantes são utilizados para oferecer alta disponibilidade (por exemplo, um WCM redundante); mecanismo de *probe* de baixo *overhead* para substituir o uso de um mecanismo de localização em DBERF; mecanismo efetivo de identificação do *cluster* mais próximo e de gerenciamento de estado dos APs (*active/stand-by*) no projeto GAPS; e mecanismo eficaz de *feedback* para dar suporte a abordagem adaptativa de seleção de modo de transmissão integrado ao esquema de gerenciamento de canais usado pelo WCM.

No caso das avaliações empíricas, seria relevante estudar o desempenho do *cluster* de APs co-localizados em um ambiente *indoor* mais amplo, onde o alcance efetivo dos dois modos de transmissão de maior vazão efetiva focados nesta tese possam ser corretamente quantificados. Idem para ambientes *outdoor*. Além disso, outro experimento que merece ser elencado é a emulação de tráfego *multicast*, o qual servirá de base para os estudos necessários para a incorporação das técnicas de reuso de fluxo (como os fluxos *multicast* não geram ACK na camada MAC, é esperado que ocorram variações em relação aos resultados quantitativos de vazão efetiva obtidos nos estudos com *unicast*).

Além destes, outro ponto relevante seria a implantação, em um cenário real, do protótipo GloVE-CINAPS implementado (Apêndice C), eventualmente estendido com as funcionalidades de segurança desenvolvidas no contexto do projeto TRAVIS-QoS. Este projeto visou o desenvolvimento e integração de *softwares* para um sistema de distribuição escalável de VoD, com acesso através de dispositivos sem fio com tecnologia 802.11 atendendo a requisitos definidos de segurança e de qualidade de serviço, fruto de um esforço conjunto de pesquisadores da COPPE/UFRJ, ligados ao LCP e ao RAVEL, do IME e da

UFES, com apoio financeiro da FINEP e do CNPq. Através desta implantação prática, seria possível coletar estatísticas para uma modelagem mais realística do comportamento dos usuários de um sistema SWVoD e eventuais detalhes de funcionamento que só aparecem em uma implantação real em grande escala. Por exemplo, dois ambientes podem ser alternativas capazes de viabilizar um experimento com grande quantidade de acessos: *hotspot* de um terminal de aeroporto (visto que é notório o uso crescente de *laptops* nestes locais, tal que a quantidade simultânea de pessoas usando estes dispositivos nos horários de maior movimento já é bastante significativa, principalmente em aeroportos freqüentados regularmente por grande número de executivos – Santos Dumont, no Rio de Janeiro, e Congonhas, em São Paulo, são os principais exemplos no Brasil) ou em um centro de convenções (durante uma grande conferência de tecnologia, por exemplo). Neste contexto, seria também relevante incorporar mecanismos para automatização da configuração dos APs (definição do canal de operação, modo de transmissão, potência, entre outros), usando a abordagem proposta em [81], onde é mostrado que é possível criar, através de engenharia reversa de interfaces *web* freqüentemente disponibilizadas pelos principais fabricantes de pontos de acesso, um mecanismo efetivo de gerenciamento, usando HTTP.

Outras três grandes questões de pesquisa que merecem ser destacadas, colocadas aqui de forma ampla, seriam a análise de soluções para sistemas SWVoD envolvendo arquiteturas WLAN distribuídas (mais conhecidas como redes *mesh*), padrões emergentes de redes sem fio (por exemplo, o IEEE 802.16, comumente chamado de WiMAX [43]) e de estratégias para alocação otimizada do espectro de freqüência e de tolerância a interferência (desde esquemas de seleção automática de canais [82], passando por engenharia de antenas inteligentes e chegando até propostas mais radicais, como é o caso de rádios cognitivos).

Referências Bibliográficas

- [1] 3Com Corporation. “3Com 11A/B/G Wireless PCI Adapter Data Sheet”.
- [2] 3Com Corporation. “3Com Wireless 7760 11A/B/G PoE Access Point Data Sheet”.
- [3] 3Com Corporation. “3Com Wireless LAN Mobility System Data Sheet”.
- [4] Abelém, A. J. G., Albuquerque, C. V. N., Muchaluat-Saade, D. C., Aguiar, E. S., Duarte, J. L., Fonseca, J. E. M., Magalhães, L. C. S. *Minicursos do SBRC 2007*, chapter 2 - Redes Mesh: Mobilidade, Qualidade de Serviço e Comunicação em Grupo. 2007.
- [5] Abram-Profeta, E. L., Shin, K. G. “Scheduling video programs in near video-on-demand systems”. In: *Proceedings of the ACM Multimedia*, pp. 359 – 369, 1997.
- [6] Acquaviva, A., Lattanzi, E., Bogliolo, A. “Design and Simulation of Power-Aware Scheduling Strategies of Streaming Data in Wireless LANs”. In: *Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pp. 39–46, Venezia, Italy, October 2004.
- [7] Alesso, H. P. *e-Video: producing Internet video as broadband technologies converge*. Addison Wesley, 2000.
- [8] Alves, J. M. O. *Implementação de uma Solução Integrada para Transmissão de Fluxos em Sistemas de Vídeo sob Demanda*. Master’s thesis, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, September 2007.
- [9] Andel, T. R., Yasinsac, A. “On the Credibility of Manet Simulations”. *IEEE Computer*, v. 7, n. 39, pp. 48–54, 2006.
- [10] Angelakis, V., Traganitis, A., Siris, V. “Adjacent channel interference in a multi-radio wireless mesh node with 802.11a/g interfaces”. In: *Proceedings of the*

26th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM) – Student Posters and Activities, Anchorage, USA, May 2007. <http://www.netsec.colostate.edu/infocom07>.

- [11] Apple Inc. “Video Ipod”, 2007. <http://www.apple.com/ipod/ipod.html>.
- [12] Atheros Communications. *Atheros AR5004X Product Bulletin*. <http://www.atheros.com/pt/AR5004XBulletin.pdf>.
- [13] Bejerano, Y., Bhatia, R. S. “MiFi: A Framework for Fairness and QoS Assurance in Current IEEE 802.11 Networks with Multiple Access Points”. In: *Proceedings of the Infocom*, Hong-Kong, China, March 2004.
- [14] Bejerano, Y., Han, S., Li, L. “Fairness and Load Balancing in Wireless LANs Using Association Control”. In: *Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, pp. 315–329, Philadelphia, PA, September 2004.
- [15] Bragato, L. L. S. *Implementação e Avaliação de um Sistema de Vídeo Sob Demanda Baseado em Cache Cooperativa Colapsada de Vídeo*. Master’s thesis, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, September 2006.
- [16] C-COR (formerly nCUBE), 2005. <http://www.ccor.com/>.
- [17] Chandra, S., Vahdat, A. “Application-specific network management for energy-aware streaming of popular multimedia formats”. In: *Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference*, pp. 329–342, Monterey, USA, June 2002.
- [18] Cheng, C., Hsiao, P., Kung, H. T., Vlah, D. “Adjacent Channel Interference in Dual-radio 802.11a Nodes and Its Impact on Multi-hop Networking”. In: *Proceedings of the Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pp. 133–144, San Francisco, USA, November-December 2006.
- [19] Dan, A., Sitaram, D., Shahabuddin, P. “Dynamic Batching Policies for an On-Demand Video Server”. *Multimedia Systems*, v. 4, n. 3, pp. 112–121, 1996.
- [20] De, P., Sharma, S., Shuvalov, A., Chiueh, T. “WiVision: A Wireless Video System for Real-Time Distribution and On-Demand Playback”. In: *Proceedings of the IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, January 2004.

- [21] Dong, X. J., Ergen, M., Varaiya, P., Puri, A. “Improving the Aggregate Throughput of Access Points in IEEE 802.11 Wireless LANs”. In: *Proceedings of the Local Computer Networks (LCN)*, pp. 682–681, Bonn/Königswinter, Germany, March 2003.
- [22] Ebert, J., Burns, B., Wolisz, A. “A trace-based approach for determining the energy consumption of a WLAN network interface”. In: *Proceedings of European Wireless (EW)*, pp. 230–236, Florence, Italy, February 2002.
- [23] Etoh, M., Yoshimura, T. “Advances in Wireless Video Delivery”. *Proceedings of the IEEE*, v. 93, n. 1, pp. 111–122, January 2005.
- [24] Ganz, A., Ganz, Z., Wongthavarawat, K. *Multimedia Wireless Networks: Technologies, Standards, and QoS*. Prentice Hall, 2004.
- [25] Garrido, J. *Practical process simulation using object-oriented techniques and C++*. Artech House, 1998.
- [26] Gray, C. G., Cheriton, D. R. “Leases: An Efficient Fault-Tolerant Mechanism for Distributed File Cache Consistency”. In: *Proceedings of the Twelfth ACM Symposium on Operating System Principles (SOSP)*, pp. 202–210, Litchfield Park, AZ, December 1989.
- [27] Haratcherev, I., Taal, J., Langendoen, K., Legendijk, R., Sips, H. “Automatic IEEE 802.11 rate control for streaming applications”. *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 5, n. 4, pp. 421–437, 2005.
- [28] Heusse, M., Rousseau, F., Berger-Sabbatel, G., Duda, A. “Performance anomaly of 802.11b”. In: *Proceedings of the 22th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*, v. 2, pp. 836–843, San Francisco, USA, March-April 2003.
- [29] Holland, G., Vaidya, N., Bahl, P. “A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks”. In: *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, pp. 236–251, Rome, Italy, 2001.
- [30] Hu, A. “Video-on-Demand Broadcasting Protocols: A Comprehensive Study”. In: *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2001*, Anchorage, Alaska, April 2001.

- [31] Hua, K. A., Cai, Y., Sheu, S. “Patching: A Multicast Technique for True Video-on-Demand Services”. In: *Proceedings of the ACM Multimedia*, pp. 191–200, 1998.
- [32] Huang, C., Li, J., Ross, K. W. “Can internet video-on-demand be profitable?”. In: *Proceedings of the annual conference of ACM Special Interest Group on Data Communications (SIGCOMM)*, pp. 133–144, Kyoto, Japan, August 2007.
- [33] IEEE. “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, 1999. ANSI/IEEE Std 802.11-1999.
- [34] IEEE. “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band”, 1999. IEEE Std 802.11b-1999.
- [35] IEEE. “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band”, 1999. ANSI/IEEE Std 802.11-1999.
- [36] IEEE. “IEEE Trial-Use Recommended Practice for Multi-Vendor Access Point Interoperability via an Inter-Access Point Protocol Across Distribution Systems Supporting IEEE 802.11 Operation”, 2003. IEEE Std 802.11F-2003.
- [37] IEEE. “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band”, 2003. IEEE Std 802.11g-2003.
- [38] IEEE. “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements”, 2005. IEEE Std 802.11e-2005.
- [39] Intelligence Support Group, 2007. http://www.isghq.com/calc/path_lossmain.php.
- [40] Ishikawa, E. *Memória Cooperativa para Distribuição de Vídeo sob Demanda*. PhD thesis, COPPE/UFRJ, October 2003.
- [41] Ishikawa, E., Amorim, C. “Cooperative Video Caching for Interactive and Scalable VoD Systems”. In: *Proceedings of the First International Conference on Networking, Part 2*, Lecture Notes in Computer Science 2094, pp. 776–785, 2001.

- [42] Ishikawa, E., Amorim, C. L. “Collapsed Cooperative Video Cache for Content Distribution Networks”. In: *Proceedings of the Brazilian Symposium on Computer Networks (SBRC)*, pp. 249–264, Natal, RN, Brazil, May 2003.
- [43] J., P. D. Maciel. *Modelagem e Análise de um Protocolo de Acesso Alternativo para o Padrão IEEE 802.16 de Redes Metropolitanas sem Fio*. Master’s thesis, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, Abril 2005.
- [44] Jones, R. “Netperf”. <http://www.netperf.org>.
- [45] Kitasuka, T., Hisazumi, K., Nakanishi, T., Fukuda, A. “WiPS: Location and Motion Sensing Technique of IEEE 802.11 Devices”. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Information Technology and Applications (ICITA)*, v. 2, pp. 346–349, Sydney, Australia, July 2005.
- [46] Korakis, T., Ercetin, O., Krishnamurthy, S., Tassiulas, L., Tripathi, S. “Link Quality based Association Mechanism in IEEE 802.11h compliant Wireless LANs”. In: *Proceedings of the 1st workshop on Resource Allocation in Wireless NETWORKS (RAW-NET) (in conjunction with IEEE WiOpt 2005)*, Riva Del Garda, Italy, April 2005.
- [47] Korhonen, J., Wang, Y. “Power-efficient streaming for mobile terminals”. In: *Proceedings of the ACM 15th International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV)*, pp. 39–44, Stevenson, USA, June 2005.
- [48] Kuo, F., Effelsberg, W., Garcia-Luna-Aceves, J. *Multimedia communications : protocols and applications*, chapter 3. Prentice-Hall, 1998.
- [49] Kurose, J. F., Ross, K. W. *Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet*. Addison-Wesley, 2 ed., 2001.
- [50] Leffler, S. “MadWifi project”. <http://www.madwifi.org>.
- [51] Liu, J. C. L., Du, D. H. C. “Continuous Media on Demand”. *IEEE Computer*, v. 34, n. 9, pp. 37–39, 2001.
- [52] Ma, H., Shin, K. G. “Multicast Video-on-Demand Services”. *ACM Computer Communication Review*, v. 32, n. 1, January 2002.

- [53] Mangold, S., Habetha, J. “IEEE 802.11 Contention-Based Medium Access for Multiple Channels”. In: *Proceedings of the 11th European Wireless Conference*, v. 2, pp. 522–526, Nicosia, Cyprus, April 2005.
- [54] Manshaei, M., Turletti, T., Krunz, M. “A media-oriented transmission mode selection in 802.11 wireless LANs”. In: *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, v. 2, pp. 1228–1233, Atlanta, GA, March 2004.
- [55] Manshaei, M. H., Turletti, T. “Simulation-based performance analysis of 802.11a wireless LAN”. In: *Proceedings of the International Symposium on Telecommunications (IST)*, pp. 758–762, Isfahan, Iran, August 2003.
- [56] McFarland, B., Wong, M. “The Family Dynamics of 802.11”. *ACM Queue*, v. 1, n. 3, pp. 28–38, May 2003.
- [57] Mishra, A., Shrivastava, V., Banerjee, S., Arbaugh, W. “Partially Overlapped Channels Not Considered Harmful”. In: *Proceedings of the Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMETRICS/Performance)*, pp. 63–74, Saint Malo, France, June 2006.
- [58] Mohapatra, S., Venkatasubramanian, N. “Proactive Energy-Aware Video Streaming to Mobile Handheld Devices”. In: *Proceedings of the IEEE 5th Mobile and Wireless Communication Networks (MWCN)*, pp. 39–46, Singapore, October 2003.
- [59] Patterson, D. A., Hennessy, J. L. *Computer Architecture - A Quantitative Approach*, chapter 1. Morgan-Kaufmann, 2 ed., 1996.
- [60] Pavon, J., Choi, S. “Link Adaptation Strategy for IEEE 802.11 WLAN via Received Signal Strength Measurement”. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, v. 2, pp. 1108–1113, Anchorage, AK, May 2003.
- [61] Pinho, L. B. *Implementação e Avaliação de um Sistema de Vídeo Sob Demanda Baseado em Cache de Vídeo Cooperativa*. Master’s thesis, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, May 2002.
- [62] Pinho, L. B., Amorim, C. L. “A Practical Performance Analysis of Stream Reuse Techniques in Peer-to-Peer Video on Demand Systems”. In: Danelutto, M., Vanneschi, M., Laforenza, D. (eds), *Euro-Par 2004 Parallel Processing, 10th International*

- Euro-Par Conference, Pisa, Italy, August 31-September 3, 2004, Proceedings*, v. 3149, *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 784–791. Springer, August 2004. ISBN: 3-540-22924-8, ISSN: 0302-9743.
- [63] Pinho, L. B., Amorim, C. L. *CINAPS: A Scalable Solution for VoD over WLANs Using Application-Friendly Association Control*. Technical Report ES-681/05, COPPE/UFRJ Systems Engineering Program, June 2005.
- [64] Pinho, L. B., Amorim, C. L. *Investigating the Performance of Video-on-Demand Systems over WLANs Using Generic Association Control*. Technical Report ES-677/05, COPPE/UFRJ Systems Engineering Program, June 2005.
- [65] Pinho, L. B., Amorim, C. L. “Investigating the Performance of Video-on-Demand Systems over WLANs Using Generic Association Control”. In: *Proceedings of the 4th Latin American Network Operations and Management Symposium (LANOMS)*, pp. 187–198, Porto Alegre, RS, Brazil, August 2005.
- [66] Pinho, L. B., Amorim, C. L. “Assessing the efficiency of stream reuse techniques in P2P video-on-demand systems”. *Journal of Network and Computer Applications (JNCA)*, v. 29, n. 1, pp. 25–45, 2006.
- [67] Pinho, L. B., Amorim, C. L. “Efficient Support to Scalable Delivery of VoD Systems Using Collocated Access Points”. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Networking (ICN)*, Morne, Mauritius, April 2006. IEEE Computer Society Press (CD-ROM).
- [68] Pinho, L. B., Amorim, C. L. “Impact of the clients’ position on performance of VoD systems based on collocated APs”. In: *Proceedings of 12th Brazilian Symposium on Multimedia and the Web (WebMedia)*, v. 1, pp. 253–262, Natal, RN, Brazil, November 2006.
- [69] Pinho, L. B., Amorim, C. L. “Otimizando o Consumo de Energia de Dispositivos Móveis em Sistemas de VoD Baseados em Pontos de Acesso Co-localizados”. In: *Proceedings of the 24th Brazilian Symposium on Computer Networks (SBRC)*, v. 1, pp. 621–636, Curitiba, Brazil, May 2006.
- [70] Pinho, L. B., Amorim, C. L. “Building Scalable Wireless VoD Systems through Efficient Management of Collocated Access Points”. *Journal of Network and Systems*

Management (JNSM), v. 16, n. 2, June 2008. (in printing, firm schedule, available online).

- [71] Pinho, L. B., Ishikawa, E., Amorim, C. L. “GloVE: A Distributed Environment for Low Cost Scalable VoD Systems”. In: *Proceedings of the 14th Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing (SBAC-PAD)*, pp. 117–124, Vitoria, ES, Brazil, October 2002.
- [72] Pinho, L. B., Ishikawa, E., Amorim, C. L. “GloVE: A Distributed Environment for Scalable Video-on-Demand Systems”. *International Journal of High Performance Computing Applications (IJHPCA)*, v. 17, n. 2, pp. 147–161, Summer 2003.
- [73] Raniwala, A., Chiueh, T. *Coverage and Capacity Issues in Enterprise Wireless LAN Deployment*. Technical Report TR-166, Stony Brook University, Computer Science Department, Experimental Computer Systems Lab, November 2004.
- [74] Raniwala, A., Chiueh, T. “Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-based Multi-channel Wireless Mesh Network”. In: *Proceedings of the INFOCOM*, v. 3, pp. 2223–2234, Miami, FL, March 2005.
- [75] Rao, S., Vin, H., Tarafdar, A. “Comparative Evaluation of Server-push and Client-pull Architectures for Multimedia Servers”. In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV)*, Shonan Village, Japan, April 1996.
- [76] Richardson, I. E. G. *H.264 and MPEG-4 Video Compression: Video Coding for Next-generation Multimedia*. Wiley, 2004.
- [77] Sadka, A. H. *Compressed Video Communications*. Wiley, 2002.
- [78] SeaChange, 2005. <http://www.schange.com/>.
- [79] Sheu, S., Hua, K. A., Tavanapong, W. “Chaining: A Generalized Batching Technique for Video-On-Demand”. In: *Proceedings of the International Conference on Multimedia Computing and Systems*, pp. 110–117, 1997.
- [80] Sheu, S., Wu, C. “Dynamic Load Balance Algorithm (DLBA) for IEEE 802.11 Wireless LAN”. *Tamkang Journal of Science ad Engineering*, v. 2, n. 1, pp. 45–52, 1999.

- [81] Silva, A. F. *Prova de Conceito de um Sistema para o Gerenciamento Integrado de Segurança em Redes sem Fio*. Master's thesis, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, July 2006.
- [82] Silva, M. W. R. *Alocação de Canal em Redes Sem Fio IEEE 802.11 Independentes*. Master's thesis, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, December 2006.
- [83] Symes, P. *Video Compression Demystified*. McGraw-Hill, 2001.
- [84] Tamai, M., Sun, T., Yasumoto, K., Shibata, N., Ito, M. "Energy-aware Video Streaming with QoS Control for Portable Computing Devices". In: *Proceedings of the ACM 14th International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV)*, pp. 68–73, Cork, Ireland, June 2004.
- [85] Tanenbaum, A. S. *Computer Networks*, chapter 7, pp. 723–760. Prentice-Hall, 3 ed., 1996.
- [86] Tirumala, A., Qin, F., Dugan, J., Ferguson, J., Gibbs, K. "Iperf". <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf>.
- [87] Tourrilhes, J. "Wireless Tools for Linux". http://www.hpl.hp.com/personal/Jean_Tourrilhes/Linux/Tools.html.
- [88] Tran, D. A., Le, M., Hua, K. A. "MobiVoD: A Video-on-Demand System Design for Mobile Ad Hoc Networks". In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, pp. 212–223, Berkeley, CA, January 2004.
- [89] Wei, Y., Chandra, S., Bhandarkar, S. "A Statistical Prediction-based Scheme for Energy Aware Multimedia Data Streaming". In: *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 2053–2057, Atlanta, USA, March 2004.
- [90] Wu, D., Hou, Y. T., Zhu, W., et al. "Streaming Video over the Internet: Approaches and Directions". *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, v. 11, n. 3, pp. 282–300, March 2001.
- [91] Yang, L., Zerfos, P., Sadot, E. "Architecture Taxonomy for Control and Provisioning of Wireless Access Points (CAPWAP)". *RFC 4118, Network Working Group*, June, 2005.

- [92] Yu, H., Zheng, D., Zhao, B. Y., Zheng, W. “Understanding user behavior in large-scale video-on-demand systems”. In: *Proceedings of the European Chapter of SIGOPS Conference (EuroSys)*, pp. 333–344, Leuven, Belgium, April 2006.
- [93] Zhu, J., Roy, S. “802.11 Mesh Networks with Two Radio Access Points”. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, v. 5, pp. 3609–3615, Seoul, Korea, May 2005.

Apêndice A

Ferramenta TCHE

Neste apêndice é apresentada uma visão geral sobre a ferramenta de simulação de eventos discretos desenvolvida para a avaliação dos mecanismos e políticas dos sistemas VoD escaláveis baseados em pontos de acesso co-localizados propostos nesta tese, chamada TCHE (*Transmission of Continuous Media over Hybrid Environments*).

A ferramenta TCHE, ilustrada na Figura A.1, foi implementada em C++ como um conjunto de objetos – Servidor de Vídeo (VS), Gerenciador de Canais sem Fio (WCM), Pontos de Acesso (APs) e Clientes (VPs) – que se comunicam através de pseudo-canais de comunicação parametrizados. Cada ação de um objeto desencadeia a geração de uma sequência de eventos (chamadas de métodos) no próprio objeto ou em outros objetos. O controle desta dinâmica é feito através de um *loop* principal que opera sobre uma lista de eventos futuros (*Future Event List* - FEL), implementada através de uma lista ordenada por tempo. Além da FEL, o objeto WCM também mantém uma lista de liberação (*Release List* - RL), também ordenada por tempo, para implementar o mecanismo de alocação preguiçosa de canais explicado no Capítulo 4.

Os parâmetros utilizados em TCHE são os seguintes (conforme sintaxe extraída da ajuda da ferramenta, ligeiramente diferente da usada no modelo apresentado no Capítulo 3):

```
Sintaxe: ./tche_simulator [semente] [clientes] [saps] [videos]
          [tempo_simulacao] [politica_WCM]
          [tam_videos] [taxa_videos] [max_latencia]
          [alcance] [area_simulacao]
```

semente: Semente usada na geração de números pseudo-aleatórios;

clientes: Número de clientes (VPs);

saps: Número de pontos de acesso (APs);

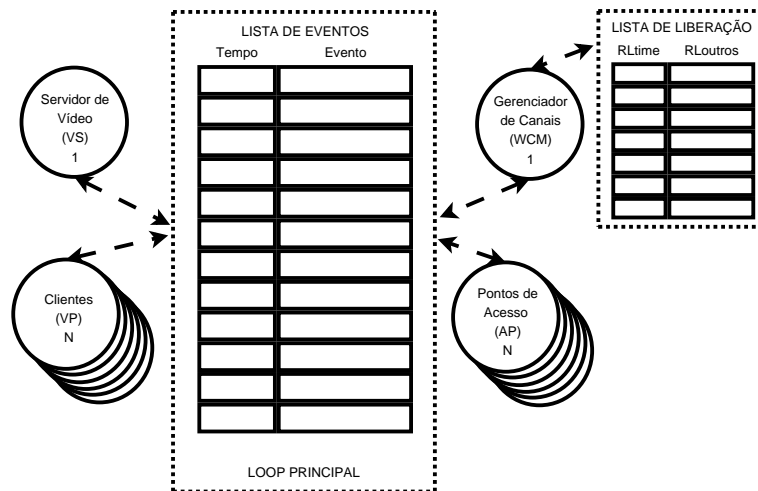


Figura A.1: Componentes da ferramenta de simulação

`videos:` Número de vídeos;
`tempo_simulacao:` Tempo de simulação;
`politica_WCM:` Heurística de controle de associação
 (LLF+=3, ERF=4, BERF=5 e DBERF=6);
`tam_videos:` Duração dos vídeos;
`taxa_videos:` Taxa dos vídeos;
`max_latencia:` Fator de Paciência;
`alcance:` Alcance efetivo do modo de transmissão usado
 (usada apenas em DBERF);
`area_simulacao:` Área de simulação (usada apenas em DBERF).

Além destes parâmetros passados na linha de comando, a ferramenta TCHE usa (dependendo da heurística escolhida) arquivos complementares – `poisson.cfg`, `zipf.cfg` e `vazao_sap.cfg` – criados por ferramentas auxiliares ou manualmente. O primeiro contém uma entrada para cada cliente, correspondente ao intervalo de tempo entre requisições, conforme um processo de Poisson (criado pela ferramenta `gen_poisson`, tendo como entrada o número de clientes e a taxa de chegada). O segundo também contém uma entrada para cada cliente, correspondente ao vídeo selecionado pelo cliente, seguindo uma distribuição Zipf (criado pela ferramenta `gen_zipf`, tendo como entrada o número de vídeos e o desvio α característico da aplicação). O terceiro contém a vazão efetiva assumida para os APs (desconsiderado quando usada a heurística DBERF descrita no Capítulo 6).

O seguinte encadeamento de eventos ajuda a ilustrar a dinâmica da ferramenta. Quando um objeto cliente é inicializado, este objeto posta na FEL o seu evento “InicializaCliente”. Este evento de inicialização, quando chega ao início da fila, é processado pelo *loop* principal (que sempre testa o tempo do evento em relação ao tempo total de simulação) de tal forma que é chamado o método “PedeRegistro” que posta, após um processamento interno, um novo evento de mesmo nome na FEL. Quando o *loop* principal processa este evento, chama o método “RecebePedidoRegistro” do AP ao qual o cliente está inicialmente associado (escolhido aleatoriamente pela ferramenta). A execução deste método termina com a postagem de um evento de mesmo nome na FEL. Quando processado, este evento gera uma chamada ao método “PedeRegistro” do mesmo AP que posta ao final do processo um novo evento “PedeRegistro” na FEL. Ao processar este evento, o *loop* chama o método “RecebePedidoRegistro” do WCM que gera o evento de mesmo nome na FEL. Diferentemente dos casos anteriores, o processamento deste evento pelo *loop* executa o método principal do WCM, o “RegistraCliente”. Dependendo da heurística configurada, dos recursos disponíveis e da situação da RL, a requisição será atendida ou não. A partir de então a cadeia contrária de eventos ocorre até que o cliente recebe a informação de registro, na qual pode constar um AP nulo (no caso de ter sido rejeitada) ou um AP válido, com uma determinada latência de serviço variando entre zero e o valor do Fator de Paciência.

Apêndice B

Ferramenta WiAssess

Neste apêndice é apresentada em linhas gerais a ferramenta de emulação de tráfego usada nos testes empíricos desta tese, denominada WiAssess (*Wireless Assessment*). Antes de descrevê-la, é importante mencionar que a sua implementação foi necessária porque as ferramentas de avaliação de desempenho de redes amplamente adotadas na literatura – Iperf [86] e Netperf [44] – não suportam uma funcionalidade correspondente ao comportamento do servidor de vídeo do CINAPS. Mais especificamente, não são capazes de gerar múltiplos fluxos temporizados (com controle global do escalonamento dos pacotes pertencentes aos diferentes fluxos) para vários clientes em máquinas diferentes.

Isto posto, a ferramenta WiAssess foi criada inicialmente em Python e depois reescrita para C++ com o objetivo de otimizar o desempenho. Assim como as outras duas ferramentas, WiAssess usa o conceito cliente/servidor de maneira contra-intuitiva, onde os fluxos medidos são transmitidos do cliente (WiAssess Client) para o(s) servidor(es) (WiAssess Server). Ao contrário das outras duas, WiAssess trabalha apenas com o protocolo UDP e suporta os parâmetros especificados abaixo (extraídos da ajuda da ferramenta):

```
WiAssess usage: ./wiassess [-h] [-s] [-c] [-t time] [-r rate]
                  [-d destination_IP] [-p destination_PORT]
                  [-f file] [-l packet_length]

-h                : Shows this message;
-s                : Server mode;
-c                : Client mode;
-t time           : Running time;
-r rate           : Stream rate;
```

```
-d IP          : Server IP (Client mode; single server);  
-p PORT       : Destination PORT (Client mode) /  
               Reception PORT (Server mode);  
-f file       : Servers sequence (Client mode; multiple servers);  
-l packet_length : Packet length.
```

Em particular, nos testes foi usada a funcionalidade de múltiplos servidores com um arquivo de sequência de máquinas rodando a versão WiAssess Server em uma porta específica. O exemplo abaixo mostra o conteúdo de um arquivo hipotético (sequence.txt) que poderia ser usado para emular o comportamento de um servidor de *streams* UDP atendendo simultaneamente quatro clientes emulados em duas máquinas.

```
10.10.10.111 10000  
10.10.10.112 10000  
10.10.10.111 10001  
10.10.10.112 10001
```

Para colocar este exemplo em prática, antes de executar a ferramenta WiAssess Client na máquina de geração de carga, é necessário inicializar os clientes emulados nas máquinas respectivas, com parâmetros compatíveis com os que serão usados na máquina de carga. Por exemplo, considerando o primeiro cliente da máquina 10.10.10.111, a sintaxe utilizada para executar uma instância de WiAssess Server para fluxos com taxa de 1024 Kbps, pacotes de 1024 B e duração de 30 s seria:

```
wiassess -s -p 10000 -l 1024 -r 1024 -t 30
```

Note que WiAssess Server só começa a computar o tempo depois do primeiro pacote ser recebido. Finalizado o tempo, apresenta três informações: número de sequência extraído do último pacote recebido; total de pacotes recebidos; e taxa computada em função do total recebido e do intervalo de tempo estabelecido.

Complementando o exemplo, para executar WiAssess Client bastaria usar a sintaxe que segue:

```
wiassess -c -f sequence.txt -l 1024 -r 1024 -t 30
```

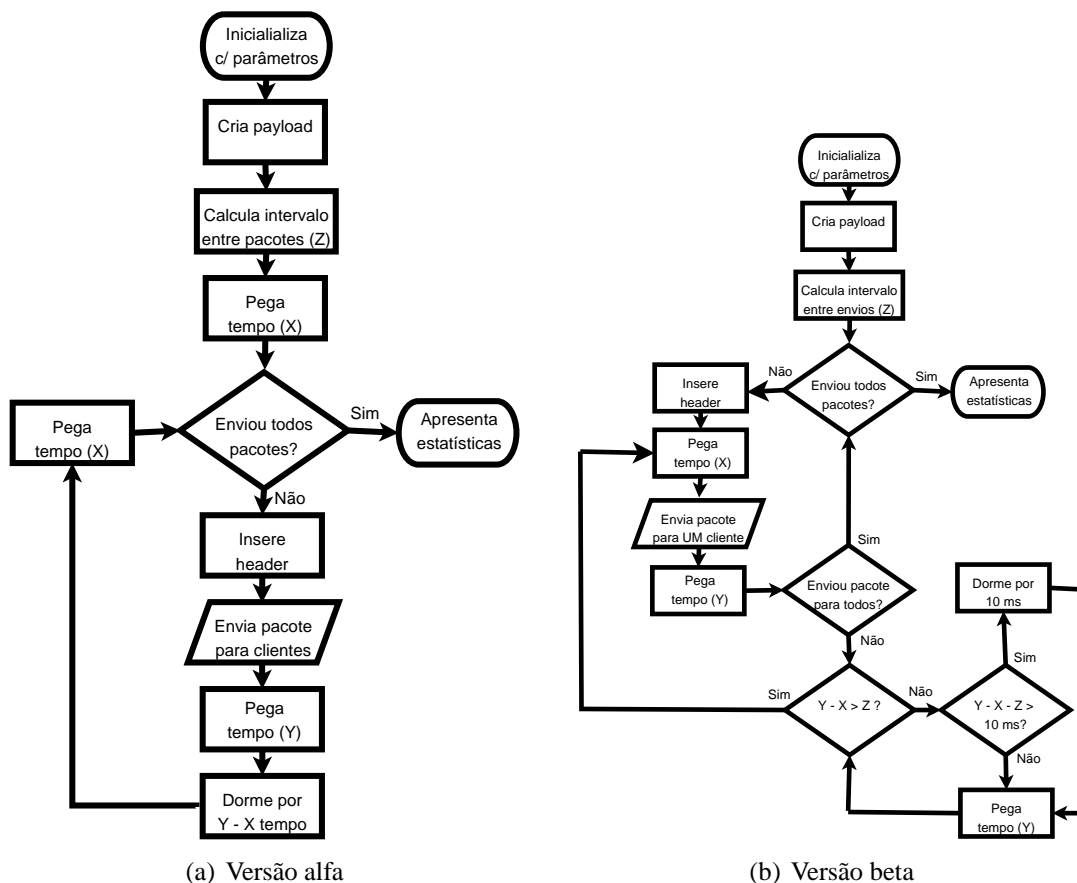


Figura B.1: Fluxogramas simplificados das versões de WiAssess Client

Finalizada a apresentação em alto nível das versões Client e Server da ferramenta WiAssess, mostra-se relevante salientar que ao longo dos experimentos da tese foram realizadas melhorias no esquema de temporização da versão Client que impactaram significativamente a precisão do tráfego gerado (conforme mostrado no Capítulo 8). Devido a diferença de comportamento, a versão antiga recebeu o nome de “alfa” e a nova passou a ser chamar “beta”.

A principal diferença na lógica de execução das duas versões pode ser apreciada nas Figuras B.1(a) e B.1(b). Na versão alfa a temporização era feita entre pacotes, isto é, não havia uma temporização entre envios do mesmo pacote para vários clientes, o que gerava imprecisão na taxa enviada. Já na versão beta, a temporização passou a ser feita entre envios, associada a um mecanismo mais efetivo de controle do tempo (combinando espera ocupada com *usleep* para intervalos superiores a 10 ms).

Apêndice C

Protótipo GloVE-CINAPS

Visando demonstrar a viabilidade de implementação do CINAPS em um sistema real, foi realizado um estudo de viabilidade de integração do Sistema GloVE de VoD escalável desenvolvido em trabalhos anteriores. Como resultado deste estudo, foi desenvolvido um novo módulo de Serviço de Gerência do GloVE (SGG) que estende o original com a incorporação das funções do WCM (*Wireless Channel Manager*). Neste apêndice, é feita uma breve apresentação do Sistema GloVE, seguida do detalhamento das modificações empreendidas na concepção do novo módulo.

C.1 Sistema GloVE

O Sistema GloVE (*Global Video Environment*) é uma solução escalável e custo-efetiva para sistemas VoD, tanto para redes locais quanto para redes de larga escala. O GloVE implementa duas técnicas otimizadas de reuso de fluxo, efetivas para ambientes que permitam o uso do paradigma P2P – CVC (*Cooperative Video Cache*) [40] – e para cenários onde o uso de *proxies* de vídeo se apresenta como mais indicado – C-CVC (*Collapsed CVC*) [40]. Inicialmente concebidas como soluções separadas – GloVE-LAN [61], que implementa CVC, e GloVE-WAN [15], que implementa C-CVC – recentemente transformou-se em uma solução integrada [8], através de um esquema flexível onde um SGBD é usado para controle dos metadados necessários para o desenvolvimento de políticas otimizadas de distribuição dos vídeos de acordo com o cenário.

Este novo esquema de gestão da distribuição é integrado ao sistema de gerenciamento desenvolvido anteriormente para o controle de autenticação, autorização, contabilidade e monitoração de usuários, denominado SGG (Serviço de Gerência GloVE). Devido a isso, o SGG se torna o componente natural para a incorporação das funcionalidades do WCM, conforme descrito abaixo. Note que devido as premissas assumidas no projeto do

CINAPS, o protótipo é configurado para não usar P2P, ou seja, todas as requisições são atendidas pelos *proxies* de vídeo do GloVE, denominados Distribuidores.

C.2 Novo Módulo SGG-WCM

As diferenças mais significativas estão concentradas no processo de Inclusão de cliente (*include client*), tanto do ponto de vista do cliente quanto do SGG. Do ponto de vista do protocolo (*sggprotocol*), apenas uma mensagem de controle foi alterada (SGG -> Cliente), com a introdução do APID (id do AP ao qual o cliente deverá se reassociar) e SL (latência de serviço). Por outro lado, na dinâmica interna destes componentes ocorrem mudanças fundamentais, conforme explicado a seguir.

C.2.1 Modificações na Dinâmica do SGG

No SGG, foi adicionado um objeto WCM (basicamente a mesma implementação existente na ferramenta TCHE apresentada no Apêndice A), o qual é consultado sempre que é recebido um pedido *include client* para o provimento de um determinado VID (ID do vídeo). Na versão atual, os parâmetros usados pelo WCM (quantidade de APs, vazão efetiva e fator de paciência) são passados por linha de comando durante a inicialização do SGG. De acordo com as características de VID (conhecidas pelo SGG pois este concentra todos os metadados do sistema) e a disponibilidade atual de largura de banda nos APs e, no caso de ocupação plena, na expectativa de liberação futura, o WCM estabelece as informações de APID e SL que serão enviadas para o cliente dentro da mensagem que anteriormente continha apenas o endereço IP do Distribuidor que enviará o fluxo de vídeo para o cliente. Para entender corretamente o processo de computação da latência de serviço, é necessário conhecer a dinâmica de funcionamento dos Distribuidores GloVE, explicada abaixo.

A operação interna do Distribuidor GloVE, implementado com base na técnica C-CVC, ocorre de forma cíclica, de acordo com a configuração de tempo (*slot time*) dos *slot buffers*. Resumidamente, os *slot buffers* são metaestruturas com duração temporal fixa que permitem associar prioridades diferenciadas aos trechos de vídeo (fundamentais para os algoritmos de substituição), armazenados em blocos de 1 KB na memória volátil (RAM). Cada vídeo é representado por um vetor de *slot buffers* associado a um vetor de *video buffers* tal que todas entradas dos *slot buffers* possuem um *video buffer* correspondente. Além disso, cada *video buffer* possui um ponteiro que aponta para uma posição

na RAM onde está armazenado o bloco de vídeo correspondente ou é NULL quando o bloco não está presente na RAM. Note que, como a configuração de tempo (*slot time*) correspondente a um *slot buffer* é fixada para todos os vídeos, a quantidade de entradas dos *slot buffers* que compõem um determinado vetor varia conforme a taxa do respectivo vídeo respectivo, assim como o tamanho dos dois vetores é função da duração total deste vídeo.

Nesta representação, o Distribuidor trata cada vídeo como uma seqüência finita de *slot buffers*, ordenados de forma crescente. Ao atender a requisição de fluxo de vídeo completo (desde o seu início), o Distribuidor associa um ou mais clientes (no caso de mais de um cliente solicitar o mesmo vídeo durante um intervalo de tempo específico, dando origem ao termo “buffer colapsado”) ao primeiro *slot buffer* do vídeo solicitado. A cada intervalo de tempo equivalente ao *slot time* configurado, o Distribuidor executa uma operação chamada de “giro do vetor”, na qual cada um dos clientes ativos é migrado para o próximo *slot buffer* ou removido do Distribuidor se já estiver no último *slot buffer*. Junto com esta operação, é também executada a operação de atualização das prioridades, substituição de trechos, criação/remoção de fluxos com o servidor (procedimento necessário para garantir que o conjunto de *video buffers* correspondente ao próximo *slot buffer* de cada um dos clientes esteja preenchido no final do *slot time*) e, em particular, o tratamento de requisições de vídeo recebidas durante o último *slot time* e construção da fila usada para o escalonamento temporizado do envio de pacotes, conforme explicado abaixo.

Para cada *slot buffer* que contenha clientes ativos são inseridas N entradas (onde N é o número de entradas no *slot buffer*) em uma fila de envio ordenada por tempo. Cada entrada desta fila contém uma referência a um bloco de vídeo que deve ser enviado para um ou mais clientes em um determinado tempo definido por um *time stamp* associado. Os *time stamps* associados são definidos em função de N e do *slot time*. Assim, basta ao Distribuidor processar esta lista respeitando os *time stamps* para que todos os pacotes sejam enviados integralmente e sem rajadas (idealmente, seria necessário um sistema operacional com escalonador *soft-realtime*; entretanto, nos experimentos práticos, realizados na rede de uma operadora de telecomunicações, um Distribuidor – Processador Intel Pentium 4 2,8 Ghz e 1 GB de RAM – com o escalonador padrão do kernel 2.6 do Linux e com alta carga – 1512 clientes com vídeos de 256 Kbps –, não foram percebidas perdas significativas que eventualmente ocorreriam em decorrência da transmissão em rajadas). Note que se um cliente é associado a um *slot buffer* cujas entradas estão apontando para

NULL, o processo de inserção deste na fila de envio é postergado até o próximo giro, quando então o conteúdo já terá sido buscado no servidor. Para evitar esta latência nas requisições realizadas para o trecho inicial do vídeo, o Distribuidor implementa um mecanismo de pré-busca configurável que permite definir quanto tempo de cada vídeo será buscado no servidor no início da execução, isto é, antes de começar a atender requisições de clientes.

Tendo em vista o esquema de tratamento de requisições de vídeo adotado, o qual introduz uma latência que pode variar de zero até um *slot time*, bem como o tempo eventualmente necessário para a busca do conteúdo no servidor, igual a um *slot time*, no pior caso a latência de serviço do Distribuidor é igual a duas vezes *slot time*. A implementação do WCM, presente no novo módulo SGG, incorpora este efeito, somando-o a duração do vídeo no mecanismo de *leases* explicado no Capítulo 4. Ou seja, quando o sub-canal (largura de banda) é reservado para a transmissão de um vídeo com duração X , o *lease* efetivamente estabelecido é de $X+2*\textit{slot time}$. Conforme explicado anteriormente, o SGG centraliza os metadados do sistema, inclusive as configurações dos Distribuidores, dentre as quais consta o *slot time*.

C.2.2 Modificações na Dinâmica do Cliente

No cliente, ao receber a resposta do SGG, são executados os seguintes passos adicionais entre o recebimento da resposta ao pedido de provedor feita ao SGG e o pedido do fluxo de vídeo ao Distribuidor selecionado:

Teste de AP Válido: testa se o APID recebido é válido, finalizando a execução quando inválido;

Teste de Latência: verifica se a latência de serviço recebida é maior que zero. Se sim, entra em ação um esquema de *sleeps* recorrentes de até 15 segundos (no GloVE, este valor é usado como intervalo de tempo entre envios de *heartbeats* do cliente para o SGG informando o seu *status*) até que seja consumido o tempo correspondente a latência de serviço;

Descoberta de AP Atual: usa as ferramentas iwtools (“Linux Wireless Extension and the Wireless Tools” [87]) providas pelo Linux para descobrir o AP ao qual está associado;

Reassociação: compara o APID recebido com o ID do AP ao qual está associado. Se for diferente, usa as ferramentas iwtools (ou eventualmente as ferramentas correspondentes ao modelo de interface usada, por exemplo do madwifi [50] para interfaces 3Com baseadas em *chipset* Atheros) para reassociar ao APID sinalizado.

Apêndice D

Resultados Parciais de Pesquisa

Este apêndice contextualiza, no tempo, os resultados parciais de pesquisa obtidos ao longo das atividades desenvolvidas nesta tese (2002-2007). A Tabela D.1 apresenta os resultados (artigos em conferências e *journals*, sem mencionar os diversos relatórios técnicos publicados no PESC/COPPE) e os períodos (divididos em semestre/ano) correspondentes às atividades que os alavancaram.

Resultado	2/2	1/3	2/3	1/4	2/4	1/5	2/5	1/6	2/6	1/7	2/7	1/8
SBAC-PAD	X											
EUROPAR				X	X							
LANOMS						X	X					
ICN							X	X				
SBRC							X	X				
WEBMEDIA								X	X			
IJHPCA		X	X									
JNCA								X				
JNSM												X
GAPS*										X		
EMPÍRICOS*											X	

Tabela D.1: Período relacionado aos resultados (*Submissão pendente)

Apêndice E

Trabalhos em VoD no LCP

Neste anexo é ilustrada (Figura E.1) a relação existente entre a presente tese e outras teses de Doutorado e Mestrado relacionadas a sistemas VoD desenvolvidas (ou em desenvolvimento) no Laboratório de Computação Paralela (LCP). Estes trabalhos, direta ou indiretamente, influenciaram as pesquisas (ou foram influenciados pelas pesquisas) realizadas ao longo da presente tese.

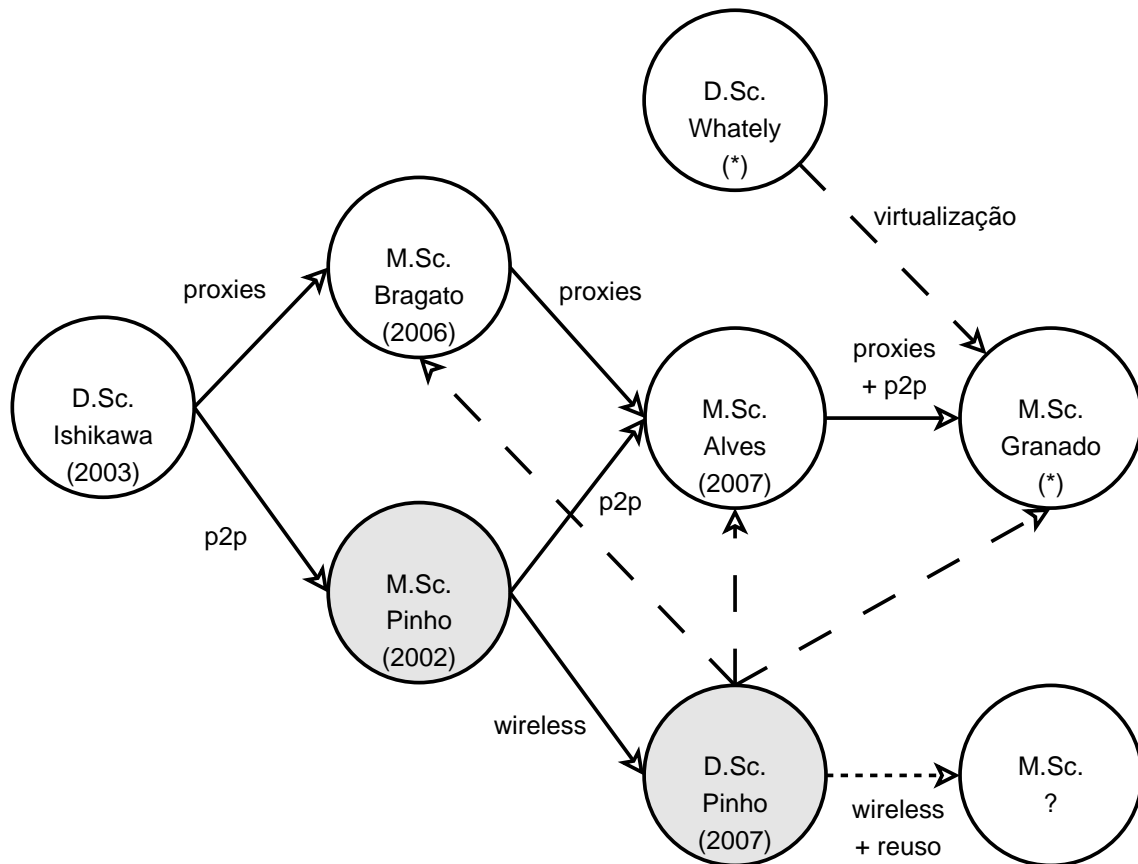


Figura E.1: Trabalhos desenvolvidos no LCP envolvendo VoD