

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TESE DE DOUTORADO

Aspectos de Avaliação de Desempenho em Redes
Ponto a Ponto e Ponto Multiponto Baseados em
Modelagem Markoviana e Medições

Lamartine Vilar de Souza

TD-03/2012

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Lamartine Vilar de Souza

Aspectos de Avaliação de Desempenho em Redes Ponto a Ponto e Ponto Multiponto Baseados em Modelagem Markoviana e Medições

TD-03/2012

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Lamartine Vilar de Souza

Aspectos de Avaliação de Desempenho em Redes Ponto a Ponto e Ponto Multiponto Baseados em Modelagem Markoviana e Medições

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2012

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO (CIP) – BC – UFPA – BELÉM/PA.

Souza, Lamartine Vilar de

Aspectos de avaliação de desempenho em redes ponto a ponto e ponto multiponto baseados em modelagem Markoviana e medições / Lamartine Vilar de Souza - Belém: UFPA, 2012.

102 f.

Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa.

Inclui Bibliografia.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica.

1 - Sistemas de comunicação sem fio 2 - Sistemas multimídia
3 - Avaliação de desempenho 4 - Sistemas banda larga I. Título

CDD 22. ed.: 621.38456

Aspectos de Avaliação de Desempenho em Redes Ponto a Ponto e Ponto Multiponto
Baseados em Modelagem Markoviana e Medições

Tese submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Data da defesa: 02/04/2012.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa
(Orientador – UFPA)

Prof. Dr. Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Jr.
(Membro – UFPA)

Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês
(Membro – UFPA)

Prof. Dr. Gláucio Haroldo Silva de Carvalho
(Membro – UFPA)

Prof. Dr. Ronaldo de Freitas Zampolo
(Membro – UFPA)

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
(Membro – UFES)

Prof. Dr. Solon Venâncio de Carvalho
(Membro – INPE)

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
(Coordenador do PPGEE – UFPA)

DEDICATÓRIA

À minha esposa Ana Patrícia e aos meus filhos Lucas, Pedro e Ana Luísa, pela (muita) paciência e compreensão nas tantas horas ausentes em razão desta Tese. Sem o pensamento em vocês e o apoio que vocês me deram (mesmo sem saber), isto tudo não seria possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Aos meus pais, Manoel e Célia, pela vida e pelos bons exemplos. Aos meus irmãos, Murilo e Arizan, pelos pensamentos de apoio e força.

À Ana Patrícia, ao Lucas, ao Pedro e à Ana Luísa, pois se não fosse por eles, não valeria a pena ter tentado.

Ao meu amigo e orientador João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa, pois foi graças a ele que esta jornada começou lá em 1995, como bolsista de Iniciação Científica do LEA.

Ao amigo Gláucio Carvalho, por ter me apresentado o nebuloso caminho da Teoria Markoviana e suas abrangentes implicações.

À banca examinadora pelas valiosas observações e comentários para a elaboração deste documento.

Aos amigos de longa data, Alexandre Casseb, Daniela Pereira, Edvar Costa, Rogério e Lilian Dias, pelas agradáveis horas de descontração, evitando assim um surto psicótico neste parto que foi esta bendita Tese.

Aos amigos e colegas do grandioso e incomparável Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA), que sempre estiveram presentes para dar sugestões e, principalmente, motivar o término desta Tese. Não posso deixar de citar em especial a Liane Barbosa, Vinicius Lima, Roberto Menezes e Gilvan Borges. Que o LEA siga vitorioso em sua grande marcha triunfante ao sucesso!

Aos colegas da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia (FACET) da UFPA de Abaetetuba pelo apoio e ajuda na hora de concentrar as disciplinas em dias específicos da semana.

A Ericsson Telecomunicações SA, ao CNPq e a UFPA, pelo apoio financeiro prestado.

A todos que, diretamente ou não, sabendo ou não, querendo ou não, contribuíram, ainda que uma nano-partícula, para esta Tese. A todos vocês, o meu muito obrigado!

*Faça o necessário, depois o possível,
de repente, você estará fazendo o impossível!*
Autor Anônimo

(...)
*Pois paz sem voz, paz sem voz
Não é paz, é medo!*
(...)
É pela paz que eu não quero seguir admitindo
(...)
Minha Alma (*A paz que eu não quero*)
O Rappa

Sumário

Lista de Abreviaturas	xiii
Lista de Símbolos	xvii
Lista de Figuras	xx
Lista de Tabelas	xxi
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação	2
1.3 Trabalhos Relacionados	5
1.4 Contribuição	8
1.5 Organização da Tese	10
2 Revisão Conceitual	12
2.1 Tecnologias de Acesso: Sistemas DSL	12
2.1.1 Introdução	12
2.1.2 ADSL	13
2.1.3 ADSL2/ADSL2+	14
2.1.4 VDSL/VDSL2	15
2.1.5 Novas Tecnologias em Redes DSL	16
2.1.6 Ruídos em Redes DSL	18
2.2 Tecnologias de Acesso: FBWNS	24
2.2.1 Introdução	24
2.2.2 QoS em FBWNS	26
2.3 Avaliação de Desempenho: Medidas	28
2.3.1 Introdução	28
2.3.2 Classificação dos Experimentos	29
2.3.3 Composição Geral de um Sistema de Medidas	29

2.4	Avaliação de Desempenho: Modelagem	30
2.4.1	Introdução	30
2.4.2	Processos Markovianos e Semi-Markovianos de Decisão	31
2.4.3	Cadeias de Markov de Tempo Contínuo - CMTC	33
3	Metodologia para Avaliação de Desempenho	39
3.1	Medidas	39
3.1.1	Sistemas ADSL2+ – Cenário 1	39
3.1.2	Sistemas ADSL2+ – Cenário 2	40
3.1.3	Sistemas ADSL2+ – Cenário 3	43
3.1.4	FBWNs – Cenário 4	43
3.2	Modelagem	45
3.2.1	Sistema ADSL2+	45
3.2.2	FBWNs	51
3.2.3	Aspectos Técnicos de Implantação da Modelagem Proposta em Redes de Acesso	55
4	Resultados	58
4.1	Medidas	58
4.1.1	Sistemas ADSL2+ – Cenário 1	58
4.1.2	Sistemas ADSL2+ - Cenário 2	59
4.1.3	Sistemas ADSL2+ – Cenário 3	60
4.1.4	FBWNs – Cenário 4	62
4.2	Modelagem	65
4.2.1	Sistemas DSL	65
4.2.2	FBWNs	70
5	Conclusões	76
5.1	Conclusões	76
5.2	Trabalhos Futuros	81
5.3	Contribuições	82
5.4	Trabalhos Gerados	83
	Referências Bibliográficas	84
A	Conceitos Básicos de Probabilidade e Estatística	96
A.1	Processos Estocásticos e Markovianos	96

A.2	Processo Markoviano Homogêneo no Tempo	96
A.3	Teorema da Probabilidade Total	97
B	Cálculo de Políticas Ótimas	98
B.1	Algoritmo de Iteração de Valores	98
C	Equipamentos Utilizados nas Campanhas de Medições	100
C.1	Gerador e Analisador de Tráfego AX/4000	100
C.2	Gerador de Ruído DLS 5500	101
C.3	Analisador de Protocolo Performer Lite	101
C.4	Simulador de Linha DLS 410E3	101

Lista de Abreviaturas

2G	Segunda geração.
3G	Terceira geração.
4G	Quarta geração.
4GBB	Quarta geração de sistemas banda larga.
AC	Corrente alternada (<i>Alternating Current</i>).
ADSL	Linha digital do assinante assimétrica (<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>).
aGP	Serviço de geração e concessão adaptativo (<i>Adaptative Granting and Polling</i>).
AIV	Algoritmo de iteração de valores.
AM	Modulação de amplitude (<i>Amplitude Modulation</i>).
AMC	Codificação e modulação adaptativa (<i>Adaptative Modulation and Coding</i>).
ANSI	Instituto americano de padronização (<i>American National Standards Institute</i>).
AOC	Controle de cabeçalho ADSL (<i>ADSL Overhead Control</i>).
ARB	Apenas ruído branco.
AS0	Canal unidirecional simplex 0.
AS1	Canal unidirecional simplex 1.
AS2	Canal unidirecional simplex 2.
AS3	Canal unidirecional simplex 3.
ATM	Modo de transmissão assíncrono (<i>Asynchronous Transfer Mode</i>).
ATU-C	Unidade transmissora ADSL na central telefônica (<i>ADSL Termination Unit - Central</i>).
ATU-R	Unidade transmissora ADSL no usuário (<i>ADSL Termination Unit - Remote</i>).
BE	Melhor esforço (<i>Best Effort</i>).
BS	Estação rádio-base (<i>Base Station</i>).
BT	Empresa inglesa de telefonia (<i>British Telecom</i>).
CAC	Controle de admissão de chamada (<i>Call Admission Control</i>).
CDF	Função distribuição cumulativa (<i>Cumulative Distribution Function</i>).
CRG	Central de gerência de redes.
CMTC	Cadeia de Markov de tempo contínuo.
CMTD	Cadeia de Markov de tempo discreto.
CO	Central telefônica (<i>Central Office</i>).
CPE	Equipamento do usuário (<i>Customer Premises Equipment</i>).
CRC	Verificação de redundância cíclica (<i>Cyclic Redundancy Check</i>).
CSV	Valores separados por vírgula (<i>Comma Separated Value</i>).
DC	Corrente contínua (<i>Direct Current</i>).
DMT	Multi-tons discretos (<i>Discrete Multi-Tone</i>).
DSL	Linha digital do assinante (<i>Digital Subscriber Line</i>).

DSLAM	Multiplexador de acesso de linha digital do assinante (<i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer</i>).
DSM	Gerenciamento dinâmico de espectro (<i>Dynamic Spectrum Management</i>).
DT	Empresa alemã de telefonia (<i>Deutsch Telekom</i>).
e-health	Serviços de saúde eletrônica.
e-government	Serviços de governança eletrônica.
EOC	Canal de operações intrínsecas (<i>Embedded Operations Channel</i>).
ertPS	Geração de serviços estendidos em tempo real (<i>Extended real-time Polling Service</i>).
ETSI	Instituto europeu de padrões em telecomunicações (<i>European Telecommunications Standards Institute</i>).
FBWN	Rede sem fio banda larga fixa (<i>Fixed Broadband Wireless Network</i>).
FDD	Duplexação por divisão de frequência (<i>Frequency Division Duplexing</i>).
FEC	Correção de erros no receptor (<i>Forward Error Correction</i>).
Fext	Diafonia distante (<i>Far-End Crosstalk</i>).
FFT	Transformada rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>).
FPA	Filtro passa altas frequências.
FPB	Filtro passa baixas frequências.
FTTC	Fibra até o armário (<i>Fiber to the Cabinet</i>).
FTTH	Fibra até o usuário (<i>Fiber to the Home</i>).
GF	Campo de Galois (<i>Galois Field</i>).
HQV	Vídeo de alta qualidade (<i>high-quality video</i>).
HTTP	Protocolo de transferência de hipertexto (<i>Hypertext Transfer Protocol</i>).
IC	Conexões Internet (<i>Internet Connections</i>).
IEEE	Instituto de engenheiros elétricos e eletrônicos (<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>).
IFFT	Transformada rápida de Fourier inversa (<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>).
IP	Protocolo Internet (<i>Internet Protocol</i>).
IPTV	Televisão sobre IP (<i>Internet Protocol Television</i>).
ISDN	Rede digital de serviços integrados (<i>Integrated Services Digital Network</i>).
ITU	União internacional de telecomunicações (<i>International Telecommunication Union</i>).
LQV	Vídeo de baixa qualidade (<i>low-quality video</i>).
LS0	Canal duplex 0.
LS1	Canal duplex 1.
LS2	Canal duplex 2.

MAC	Controle de acesso ao meio (<i>Medium Access Control</i>).
Mbps	Mega bits por segundo.
MOS	Pontuação média de opinião (<i>Mean Opinion Score</i>).
MPEG	Grupo de especialistas em imagens com movimento (<i>Moving Picture Experts Group</i>).
MRTG	Gerador de tráfego multi-roteado (<i>Multi Router Traffic Grapher</i>).
Next	Diafonia próxima (<i>Near-End Crosstalk</i>).
NGN	Rede de próxima geração (<i>Next Generation Network</i>).
nrtPS	Geração de serviços em tempo não-real (<i>Non-real-time Polling Service</i>).
NS	Simulador de rede (<i>Network Simulator</i>).
NTR	Referência de temporização de rede opcional (<i>Network Timing Reference</i>).
OAM	Operação, administração e manutenção (<i>Operation, Administration and Maintenance</i>).
OEFMON	Programa de avaliação para tráfego multimídia (<i>Open Evaluation Framework for Multimedia over Networks</i>).
PAMS	Sistema de medição/análise de percepção (<i>Perceptual Analysis/Measurement System</i>).
PESQ	Avaliação da percepção da qualidade de voz (<i>Perceptual Evaluation of Speech Quality</i>).
PHY	Camada física (<i>Physical Layer</i>).
PLC	Comunicação via rede de energia elétrica (<i>Power Line Communication</i>).
PMD	Processo Markoviano de decisão.
PMP	Ponto-multiponto (<i>Point to Multipoint</i>).
PMTC	Processo Markoviano de tempo contínuo.
PMTD	Processo Markoviano de tempo discreto.
POTS	Planta de serviço telefônico (<i>Plain Old Telephone Service</i>).
PP	Ponto a ponto (<i>Point to Point</i>).
PSD	Densidade espectral de potência (<i>Power Spectral Density</i>).
PSTN	Rede de serviço telefônico (<i>Public Switched Telephone Network</i>).
PSMD	Processo semi-Markoviano de decisão.
PSTN	Rede de serviço telefônico (<i>Public Switched Telephone Network</i>).
PTM	Modo de transferência de pacotes (<i>Packet Transfer Mode</i>).
QoS	Qualidade de serviço (<i>Quality of Service</i>).
RE	Alcance estendido (<i>Reach Extended</i>).
RFI	Ingresso de radio frequência (<i>Radio Frequency Ingress</i>).
RLC	Resistivo-indutivo-capacitivo.
RS	Estação repetidora (<i>Repeater Station</i>).
RS	Reed-Solomon.
rtPS	Geração de serviços em tempo real (<i>Real-time Polling Service</i>).
SHDSL	Linha digital do assinante simétrica a alta taxa de bits (<i>Symmetric High-Bit Rate DSL</i>).
SIP	Protocolo de inicialização de sessão (<i>Session Initiation Protocol</i>).
SLA	Acordo de nível de serviço (<i>Service Level Agreement</i>).

SM	Módulo de serviço (<i>Service Module</i>).
SNMP	Protocolo simples de gerência de rede (<i>Simple Network Management Protocol</i>).
SNR	Relação sinal ruído (<i>Signal to Noise Rate</i>).
SRA	Taxa de adaptação sem interrupções (<i>Seamless Rate Adaptation</i>).
STM	Modo de transporte síncrono (<i>Synchronous Transfer Mode</i>).
TDD	Duplexação por divisão de tempo (<i>Time Division Duplexing</i>).
TDIM	Multiplexação inversa por divisão do tempo (<i>Time Division Inverse Multiplexing</i>).
T-R	Interface entre ATU-R e rede do assinante.
TCP	Protocolo de controle de transmissão (<i>Transmission Control Protocol</i>).
U-C	Interface entre a linha e o <i>splitter</i> C.
U-C2	Interface entre o ATU-C e o <i>splitter</i> C.
U-R	Interface entre a linha e o <i>splitter</i> R.
U-R2	Interface entre o ATU-R e o <i>splitter</i> R.
UGS	Concessão de serviço não-solicitado (<i>Unsolicited Grant Service</i>).
V-C	Interface entre o ATU-C e a rede banda larga.
VDSL	Linha digital do assinante de alta taxa de dados (<i>Very-high-data-rate DSL</i>).
VoD	Vídeo sob demanda (<i>Video on Demand</i>).
VoIP	Voz sobre IP (<i>Voice over IP</i>).
WCDMA	Acesso múltiplo por divisão de código banda larga (<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>).
WiMAX	Interoperabilidade mundial via acesso de microondas (<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>).
Wi-fi	Fidelidade sem fio (<i>Wireless Fidelity</i>).
WLAN	Rede local sem fio (<i>Wireless Local Area Network</i>).
WWW	Grande rede mundial (<i>World Wide Web</i>).

Lista de Símbolos

a	Ação relacionada a um estado i .
A	Conjunto de ações possíveis.
$A(i)$	Conjunto de ações possíveis e/ou permitidas em um estado i .
B	Capacidade do sistema.
B_{vi}	Taxa de dados da chamada de vídeo.
B_{vo}	Taxa de dados da chamada de voz.
$C_t(i, a)$	Custo ou recompensa da ação a em um estado i a um tempo t .
$C_t(i, a, j)$	Custo ou recompensa da ação a em um estado i a um tempo t e o sistema ocupa um estado j a um instante de decisão $t + 1$.
d	Decisão estacionária.
d	Chamadas de dados no sistema.
d_t	Decisão em um instante de tempo t .
Δt	Variação de tempo t .
$G_n(f)$	Densidade espectral de potência.
$G_0(f)$	Densidade espectral de potência do ruído de saída.
$H(f)$	Função de transferência.
i	Estado, $i \in S$.
j	Estado, $j \in S$.
k	Número de blocos de dados.
k	Estado, $k \in S$.
λ_d	Taxa de chegada de dados.
λ_{vi}	Taxa de chegada de vídeo.
λ_{vo}	Taxa de chegada de voz.
L	Número de palavras de código.
n	Tamanho total do código RS.
n	Número inteiro.
\mathbb{N}	Números naturais.
\mathbb{N}_0	Números naturais sem incluir o zero.
$1/\mu_d$	Tempo de serviço das chamadas de dados.
$1/\mu_{vi}$	Tempo de serviço das chamadas de vídeo.
$1/\mu_{vo}$	Tempo de serviço das chamadas de voz.
N	Maior valor dos instantes possíveis de tempo.
N_0	Potência de saída do ruído.
Π	Seqüência de regras de decisões.
Π^*	Política ótima que maximiza a função recompensa esperada total em relação a todas as políticas existentes.

$p_{ij}(u, v)$	Probabilidade de transição de uma CMTC transitando do estado i ao estado j durante o período de tempo $[u, v)$.
$p_{ik}(u, v)$	Probabilidade de transição de uma CMTC transitando do estado i ao estado k durante o período de tempo $[u, v)$.
$p_{kj}(u, v)$	Probabilidade de transição de uma CMTC transitando do estado k ao estado j durante o período de tempo $[u, v)$.
π	Probabilidade no estado de equilíbrio.
π_i	Probabilidade no estado de equilíbrio.
$\pi_i(u)$	Probabilidade de transição de um estado i de uma CMTC no tempo u .
$\pi_j(v)$	Probabilidades de estado incondicionais de um estado j de um processo Markoviano no tempo v .
$P(u, v)$	Matriz de transição de probabilidades.
ψ	Largura de banda total utilizada pelas chamadas de tempo real.
Q	Matriz geradora infinitesimal.
$p_t(\cdot i, a)$	Probabilidade de transição.
$q_{ij}(t)$	Taxa de transição instantânea de uma CMTC movendo-se de um estado i para um estado j .
\mathbb{R}_0^+	Sub-conjunto não negativo dos números reais.
s	Bits por símbolo.
s_i	Estado, $s_i \in S$.
S	Conjunto de estados possíveis.
t	Instante de tempo.
T	Conjunto de valores da variável tempo ou conjunto de instantes de decisão.
T	Conjunto de instantes de decisão.
u	Instante de tempo.
v	Instante de tempo.
vi	Chamadas de vídeo no sistema.
vo	Chamadas de voz no sistema.
w	Instante de tempo.
X_t	Processo estocástico.

Lista de Figuras

2.1	Modelo de referência para um sistema ADSL.	14
2.2	Configuração geral para um sistema <i>DSL Bonding</i>	16
2.3	Exemplo de ruído Next.	20
2.4	Exemplo de ruído Fext.	20
2.5	Estrutura de código Reed-Solomon.	23
2.6	Exemplo de topologia ponto-multiponto típica.	25
3.1	Cenário de testes para medições em ADSL2+ – Cenário 1.	40
3.2	Cenário de testes para medições em ADSL2+ – Cenário 2.	41
3.3	Cenário de testes para medições em FBWNs – Cenário 4.	44
4.1	Taxa de pacotes transmitidos no downstream para a injeção de C1 no lado CO.	61
4.2	Taxa de pacotes perdidos no downstream para a injeção de C1 no lado CO.	62
4.3	Taxa de pacotes transmitidos no downstream para a injeção de C2 no lado CO.	62
4.4	Taxa de pacotes perdidos no downstream para a injeção de C2 no lado CO.	63
4.5	Vazão de dados (throughput) medida para os dois tipos de tráfego multimídia.	64
4.6	Latência medida para o vídeo com resolução de 640x480.	64
4.7	Probabilidade de bloqueio para tráfego de vídeo versus variação de λ_{vi}	66
4.8	Probabilidade de bloqueio para tráfego de áudio versus variação de λ_{vi}	66
4.9	Probabilidade de bloqueio para tráfego de dados versus variação de λ_{vi}	67
4.10	Utilização dos recursos versus variação de λ_{vi}	68
4.11	Probabilidade de bloqueio para tráfego de áudio versus variação de λ_{vo}	68
4.12	Probabilidade de bloqueio para tráfego de dados versus variação de λ_{vo}	69
4.13	Utilização dos recursos versus variação de λ_{vo}	69

4.14	Probabilidade de bloqueio para o tráfego total utilizando o CAC proposto.	70
4.15	Utilização de recursos utilizando o CAC proposto.	71
4.16	Probabilidade de bloqueio para diferentes taxas de dado para vídeo. .	72
4.17	Impacto dos serviços HQV nas probabilidades de bloqueio de tráfego.	73
4.18	Impacto dos serviços HQV na utilização de recursos.	74

Lista de Tabelas

1.1	Publicações relacionadas a esta Tese.	10
2.1	Resumo das tecnologias DSL.	13
2.2	Siglas utilizadas no modelo ADSL.	14
3.1	Equipamentos utilizados para as medições em ADSL2+ – Cenário 1.	40
3.2	Equipamentos utilizados para as medições em ADSL2+ – Cenário 2.	41
3.3	Classificação MOS.	42
3.4	Equipamentos utilizados para as medições em FBWN – Cenário 4.	44
3.5	Parâmetros utilizados na modelagem Markoviana.	51
3.6	Transições do estado $\Psi = (i, j, l)$ para todos os possíveis estados sucessores.	54
3.7	Parâmetros utilizados nas análises numéricas da modelagem proposta.	55
4.1	Resultados medidos para ADSL2+ – Cenário 1.	58
4.2	Valores médio, desvio padrão e intervalo de confiança – Cenário 1.	59
4.3	Resultados medidos para o VoIP – Cenário 2.	59
4.4	Resultados medidos para o HTTP – Cenário 2.	60
4.5	Resultados medidos para vídeo – Cenário 2.	60
4.6	Resultados obtidos do MOS para vídeo – Cenário 4.	65
4.7	Possíveis taxas de dados para os serviços de vídeo.	72

RESUMO

Esta Tese apresenta uma metodologia para avaliação de desempenho de redes de acesso banda larga. A avaliação de desempenho de redes é uma forma de identificar e analisar como determinadas características, tais como diferentes tipos de tráfego ou formas de utilização por exemplo, podem influenciar no comportamento da rede em foco, podendo assim prever como tal rede se comportará frente a situações futuras. A metodologia apresentada é composta de duas abordagens: uma abordagem baseada em medições e outra baseada em modelagem via processos Markovianos. As redes analisadas englobam os dois tipos básicos de arquitetura de acesso: redes ADSL2+ (linha digital do assinante assimétrica 2+ – *Asymmetric Digital Subscriber Line 2+*), as quais são redes cabeadas que utilizam cabos metálicos de pares trançados; redes FBWN (rede sem fio banda larga fixa – *Fixed Broadband Wireless Network*), as quais são redes sem fio (*wireless*) baseadas no padrão IEEE 802.16. A abordagem de medições é focada na forma como a rede analisada se comporta frente a três situações: transmissão de um tráfego genérico; impacto de ruídos não-estacionários no sistema; e uso da rede como meio de transmissão de tráfego multimídia em tempo real. A abordagem de modelagem, por sua vez, é baseada em prever o comportamento das redes analisadas utilizando uma formulação matemática fundamentada em processos Markovianos. Os resultados apresentados indicam a viabilidade de aplicação desta metodologia como forma de avaliação de desempenho. Os resultados ainda tornam possível a extensão desta metodologia a outros tipos de redes de acesso

banda larga, tais como: redes de fibras ópticas, redes de enlaces de microondas, redes VDSL/VDSL2 (linha digital do assinante de alta taxa de dados – *Very-high-data-rate DSL*), etc.

Palavras-chave: Sistemas de comunicação sem fio, sistemas multimídia, avaliação de desempenho, sistemas banda larga.

ABSTRACT

This thesis presents a methodology for performance evaluation of broadband access networks. The performance evaluation of networks is a way to identify and analyze how certain features, such as different traffic types or forms of use, can influence the behavior of the network in focus. This way, we can predict how the network will behave in future situations. The methodology is composed of two approaches: an approach based on measurements and the other based on modeling using Markov processes. The networks analyzed cover the two basic types of access architecture: ADSL2+ (asymmetric digital subscriber line 2+) networks, which are wired networks that use twisted pair cables; FBWN (fixed broadband wireless network) networks, which are wireless networks based on IEEE 802.16 standard. The measurement approach is focused on network behavior against three situations: transmission of a generic traffic, impact of non-stationary noise in the system, and using network for the transmission of real-time multimedia traffic. The modeling approach, in its turn, is based on predicting the behavior of the network using mathematical models based on Markov processes. The results presented indicate the feasibility of applying this methodology as form of performance evaluation. The results also make possible the extension of this methodology to other types of broadband access networks such as fiber optic networks, microwave links, and VDSL/VDSL2 (Very-high-data-rate DSL) networks.

Keywords: Wireless communication systems, multimedia systems, performance evaluation, broadband systems.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

As evoluções tecnológicas ocorridas nos últimos anos tiveram um profundo impacto na forma como o mundo atual se comunica e interage. É cada vez mais real o conceito de comunicação em termos de *qualquer conteúdo, em qualquer lugar e a qualquer hora*.

As redes banda larga são o caminho para prover este tipo de comunicação. As possibilidades de comunicação existentes em tais redes trazem, a cada dia, novas formas de entretenimento e de serviços, ocasionando assim novas demandas e desafios a serem atendidos e vencidos [1–3].

Comunicação banda larga não envolve apenas o acesso à Internet, mas também a possibilidade de utilização de aplicações que vão de voz a dados, de sons a imagens em movimento e de telefonia fixa à telefonia móvel, ou, em outras palavras, toda uma gama de serviços que não se restringem a um só tipo de dado.

Vários desses serviços são baseados em aplicações multimídia tais como: voz sobre IP (Voice over IP - VoIP); vídeo conferência; vídeo sob demanda (Video on Demand - VoD); televisão sobre IP (Internet Protocol Television - IPTV); jogos de computador em rede; *e-health* e *e-government* (serviços de saúde e governança eletrônica) [4–6].

Tais serviços são genericamente chamados de serviços multimídia ou *triple play*, ou seja, serviços compostos de voz, vídeo e dados.

As redes banda larga podem utilizar um leque diverso de soluções tecnológicas, sendo cada solução mais apropriada para uma situação específica. Algumas tecnologias hoje disponíveis são: redes DSL (Digital Subscriber Line - linha digital do assinante); redes via satélite; redes via fibra óptica; redes PLC (power line communications - comunicação via rede de energia elétrica); redes celulares 3G/4G (terceira e quarta geração, respectivamente); redes WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access - interoperabilidade mundial via acesso de microondas) baseadas

no padrão IEEE 802.16, entre outras.

Em alguns casos, a utilização em conjunto destas tecnologias é a melhor maneira de prover serviços banda larga em grande escala em uma dada região [7–9].

As tecnologias DSL se destacam por possuir uma grande abrangência em âmbito mundial, sendo consideradas como a tecnologia de acesso banda larga predominante não só na Europa, como também na América Latina e em países em desenvolvimento como a Índia [10–12]. No Brasil, no final de 2010 a tecnologia DSL era responsável por cerca de 30% de todo o acesso banda larga realizado [13]. Em termos quantitativos, no final do primeiro semestre de 2010 as conexões DSL no Brasil chegaram a quase 8.425.000 [14].

Outras tecnologias tais como conexão via cabo (óptico, metálico ou coaxial), conexão via rádio, acesso celular móvel e conexão via satélite, tinham participação de 25%, 12%, 10% e 3%, respectivamente, no conjunto de tecnologias utilizadas para acesso banda larga no Brasil em 2010 [13].

Apesar de tais números, a penetração dos serviços banda larga nas residências da América Latina está estimada em apenas 17% para o final de 2015 [15]. Desta forma, pode-se compreender que há um longo caminho a percorrer para a massificação dos serviços banda larga na América Latina.

Desta forma, uma metodologia que possibilite uma avaliação de desempenho destes tipos de rede se faz necessária. A quantidade de requisitos de Qualidade de Serviço (QoS – Quality of Service) e de Qualidade de Experiência (QoE – Quality of Experience) existentes para cada tipo de serviço oferecido cada vez é mais peculiar. Desta forma, o número de variáveis e restrições existentes em cada rede torna a tarefa de avaliação de desempenho cada vez mais desafiadora.

Tal abrangência de particularidades juntamente com a motivação apresentada na próxima seção influenciaram no desenvolvimento desta Tese.

1.2 Motivação

Dois assuntos estão diretamente relacionados a comunicações banda larga: gerenciamento de recursos e QoS.

Cada vez mais aumenta a demanda pela garantia de níveis mínimos de serviço bem como a busca por uma forma otimizada de gerenciamento dos recursos disponíveis do sistema e, conseqüentemente, aumento de desempenho dos mesmos [16–26]. Tais demandas são alvos constantes de pesquisa, independente da área de aplicação ou

tecnologia de acesso utilizada.

Em [16] os autores apresentam um modelo para controle de congestionamento em redes sem fio com suporte a serviços multimídia. Tal modelo é baseado em lógica Fuzzy e possibilita o atendimento de níveis mínimos de atraso nas comunicações realizadas.

Em [17] os autores apontam os desafios existentes em garantir níveis mínimos de QoS em redes sem fio banda larga fixas (FBWNs – Fixed Broadband Wireless Networks) baseadas no padrão IEEE 802.16, em particular indicando a importância do uso de controles de admissão de chamadas (CAC – Call Admission Control) eficientes e agendamento adequados em tais redes.

Em [18] os autores propõem um CAC alternativo para redes IEEE 802.16 móveis, sendo este CAC voltado, principalmente, para aplicações de vídeo com requisitos específicos de QoS. O CAC proposto considera a existência de um repositório temporário para armazenamento de dados de vídeo, a fim de evitar eventuais bloqueios do sistema por ausência momentânea de capacidade para transmissão.

Em [19] [20] os autores apresentam uma técnica para otimização de largura de banda considerando a capacidade individual de cada enlace da rede componente do sistema. Tal técnica é baseada no conhecimento prévio dos acordos de níveis de serviço (SLA – Service Level Agreement) pactuados entre operadoras e usuários do sistema.

Em [21] os autores discutem a importância de uma gerência eficiente de recursos nas redes de próxima geração (NGN – Next Generation Network). Segundo os autores, tal gerência de recursos terá papel fundamental na adequada transmissão dos diferentes tipos de tráfego existentes (vídeo, voz e dados) e no atendimento a níveis previamente estabelecidos de QoS com o usuário.

Em [22] os autores apresentam um modelo genérico de gerenciamento de QoS para redes sem fio, onde atraso fim a fim (fonte ao destino) na transmissão é analisado. Os resultados apresentados indicam que este parâmetro tem especial impacto no nível de satisfação dos usuários de tal serviço.

Em [23] um gerenciamento adaptativo de largura de banda também em redes sem fio para tráfego multimídia é apresentado. Neste trabalho é utilizado um CAC baseado na largura de banda disponível do sistema, de tal forma que haja uma máxima utilização de largura de banda e baixa probabilidade de bloqueio do sistema.

Em [24] os autores propõem um algoritmo para gerência de recursos e de QoS para sistemas banda larga via satélite. Nesse caso, recursos tais como banda de

frequência utilizada e potência de transmissão são otimizados de forma a proporcionar o atendimento a parâmetros de QoS, tais como atraso, variação do atraso e taxa de erro.

Em [25] é proposto um esquema para gerenciamento dinâmico de QoS e reconfiguração automática da largura de banda em uma rede de computadores genérica. Tal esquema é baseado na utilização de valores pré-definidos de largura de banda em função dos tipos de tráfego (vídeo, voz e dados) do sistema.

Em [26] os autores apresentam uma técnica para identificação de *crosstalk* em sistemas DSL, permitindo assim a melhora de desempenho na transmissão de dados destes sistemas.

Percebe-se que nos trabalhos anteriormente citados, a adequada gerência dos recursos disponíveis no sistema tem influência direta no atendimento aos níveis de qualidade previamente definidos entre usuários e a operadora de serviços.

O atendimento a níveis pré-estabelecidos de QoS para uma gama de novos serviços, em particular para o tráfego multimídia, vem ganhando especial atenção. Fatores que impactam no desempenho do sistema frente ao tráfego multimídia, e por consequência no desempenho da rede, e novas maneiras de otimizá-lo têm sido alvo de diversos estudos [27–34].

Em [27] os autores analisam a distribuição de tráfego multimídia em redes sem fio. Políticas para uma melhor distribuição de vídeo sobre redes sem fio são analisadas e sugeridas.

Em [28] os autores apresentam os desafios de atendimento a níveis mínimos de QoS e as soluções atuais para o tráfego de vídeo em redes sem fio, em particular para o padrão de vídeo H.264.

Em [29] os autores apresentam um esquema para transmissão multimídia em redes de terceira geração de acesso múltiplo por divisão de código banda larga (3G WCDMA – Wideband Code Division Multiple Access). O esquema proposto analisa parâmetros característicos do canal de rádio, tais como taxa de perda de pacotes e nível de congestionamento da rede, para depois implementar ações de melhoria baseada em uma modelagem física do canal.

Em [30] os autores analisam os principais problemas para se obter um adequado QoS para uma transmissão multimídia em redes sem fio heterogêneas. Fatores como congestionamento, desconexões temporárias e *handoffs* são os principais desafios encontrados em tais redes.

Em [31] os autores apresentam uma ferramenta para alocação de largura de banda

em redes NGN para serviços multimídia considerando as particularidades de cada tráfego envolvido.

Em [32] o autor apresenta requisitos mínimos como infra-estrutura adequada e controle eficiente dos recursos disponíveis para o adequado oferecimento de serviços multimídia em redes banda larga genéricas.

Em [33] o autor aponta algumas mudanças necessárias nas redes de transporte para o adequado suporte ao tráfego multimídia, tais como reserva de largura de banda e suporte a QoS.

Em [34] o autor desenvolve modelagens, via Cadeia de Markov, para analisar o desempenho de sistemas DSL quando ocorre a transmissão *triple play*, ou seja, composta por dados, vídeo e voz. Os resultados indicam a possibilidade de se obter uma degradação suave de tais serviços quando houver sobrecarga na rede.

Em face de uma grande gama de serviços existentes para o usuário de um sistema banda larga, faz-se necessária uma utilização otimizada dos recursos disponíveis, a fim de que os diversos tipos de tráfego possam ser transportados de uma forma ótima.

Uma adequada avaliação de desempenho permite conhecer as potencialidades e limitações existentes em uma dada rede, e assim gerenciar melhor seus recursos e atuar, de uma forma ótima, na utilização dos mesmos. Tais demandas originaram a ideia central desta Tese, a qual será detalhada nas seções e capítulos posteriores.

1.3 Trabalhos Relacionados

Esta Seção tem por objetivo apresentar alguns trabalhos existentes na literatura e que estão relacionados com a linha de pesquisa desta Tese.

Avaliações de desempenho em redes de telecomunicações têm sido objeto de investigação com diferentes tipos de abordagens: simulação, modelagem e medidas [35–40].

Em [35] os autores analisam o desempenho de transmissão de vídeo sobre redes WiMAX com mobilidade. A análise realizada é baseada na utilização de um ambiente de simulação de pacotes (NS-2) e na modelagem do canal através de uma Cadeia de Markov de tempo discreto (CMTD). As análises realizadas indicam que um ponto ótimo entre a correção de erros do sistema e o atraso existente na rede deve ser especificado, sob pena de aumentar o congestionamento da rede.

Em [36] os autores apresentam uma avaliação de desempenho para gerência dos recursos disponíveis em redes de rádio heterogêneas, isto é, redes com diferentes tipos de tecnologias disponíveis (celular, WiMAX, wi-fi, etc). As diferentes condições

de cobertura entre as redes são analisadas através de uma modelagem Markoviana. Fatores como tipo de tráfego e contenção de recursos disponíveis influenciaram no desempenho dos sistemas analisados.

Em [37] os autores apresentam um estudo de avaliação de desempenho para uma FBWN utilizada para a transmissão de sinal de televisão. A proposta se baseia na realização de medidas de qualidade de vídeo nos canais de *downlink* e *uplink* da rede. Através destas análises, limiares de utilização ótima envolvendo a carga da rede e níveis de qualidade na transmissão de vídeo são estabelecidos.

Em [38] os autores apresentam um algoritmo de agendamento para transmissão de tráfego de tempo real e não-real em redes WiMAX. As análises realizadas foram baseadas em simulações e os resultados mostram que o esquema proposto ocasionou um melhor desempenho do sistema quando foram analisadas métricas tais como atraso e perda de pacotes.

Em [39] os autores apresentam um estudo para avaliação de desempenho entre redes ADSL e ADSL2+ baseado em medidas. O cenário analisado não considerou a existência de ruído no sistema e parâmetros como taxa de bits e relação sinal-ruído (SNR – Signal to Noise Rate) foram coletados para um enlace obtido via simulador de linha e cabo real.

Em [40] os autores apresentam uma plataforma de simulação para ambientes DSL onde é possível a análise de desempenho de tais sistemas frente a situações de existência de *crosstalk* e ruído branco. Parâmetros como taxa de dados e SNR para tráfego de *downstream* e de *upstream* podem ser obtidos e analisados.

Os processos de Markov têm se mostrado uma ferramenta eficaz para análise sistêmica e gerenciamento ótimo dos recursos disponíveis em sistemas de telecomunicações [41–51].

Em [41] os autores apresentam um estudo de desempenho para aplicações multimídia sobre redes baseadas no padrão IEEE 802.11 em ambientes de redes metropolitanas. Neste trabalho, os autores usaram um modelo de desempenho da rede baseado em Cadeia de Markov de Tempo Contínuo (CMTC) a fim de realizar análises sobre tráfego VoIP em conjunto com outras aplicações do tipo HTTP e de vídeo. Parâmetros como *delay*, *jitter* and MOS (Mean Opinion Score - pontuação média de opinião) foram obtidos e analisados com tal modelagem.

Em [42] os autores utilizam uma CMTC para analisar o desempenho de uma rede de rádio cognitivo que utiliza técnicas de agregação de canal. Esta análise é baseada em parâmetros básicos tais como capacidade do sistema e probabilidade de bloqueio

e os resultados indicam um limiar de utilização para estas técnicas de agregação.

Em [43] os autores utilizam uma CMTC para analisar a alocação dinâmica de espectro em redes de rádio cognitivas entre usuários primários e usuários secundários. Neste trabalho, a CMTC permitiu que uma abordagem ótima de utilização de espectro seja utilizada, compensando assim a degradação na vazão de dados causada por interferência oriunda de usuários secundários.

Em [44] os autores analisam a capacidade de *downlink* de uma rede IEEE 802.16 na presença de dois tipos básicos de tráfego: fluxo (tráfego de voz) e elástico (tráfego TCP). É analisado, via CMTC, o impacto destes tráfegos na interferência inter-células e na codificação e modulação adaptativa (AMC – Adaptive Modulation and Coding) do sistema. Parâmetros como probabilidade de bloqueio e taxa média de transferência são obtidos e quantificados para usuários próximos à estação rádio base.

Em [45] os autores investigam a modelagem *cross-layer*, via CMTC, da capacidade de sistemas sem fio também na presença de dois tipos de tráfego: fluxo e elástico. Três tipos de redes são analisadas (3G, WLAN e WiMAX), considerando o desempenho das camadas mais inferiores (MAC/PHY).

Em [46] os autores propõem um modelo otimizado para um CAC em redes sem fio utilizando uma CMTC. No esquema proposto, para limitar a quantidade de largura de banda alocada para cada tipo de serviço, a largura de banda disponível é compartilhada entre os diferentes tipos de serviço usando uma abordagem baseada em particionamento completo dos recursos disponíveis.

Em [47] os autores apresentam um CAC, baseada em CMTC, para serviços de tempo real e tempo não-real para uma rede baseada no padrão IEEE 802.16 usando modulação e codificação adaptativa na camada física.

Em [48] os autores propõem um modelo de serviço para tráfego multimídia em redes IEEE 802.16 utilizando uma CMTC. Neste caso, os fluxos de serviço da rede são priorizados de acordo com os seus requisitos de QoS.

Em [49] os autores apresentam um esquema de decisão para *handoff* entre redes sem fio heterogêneas (redes celulares e redes locais de computadores) baseado em PSMD (Processo Semi-Markoviano de Decisão). O esquema proposto avalia o desempenho da rede baseado nas preferências do usuário e, a partir daí, decide qual é a rede mais apropriada para o mesmo. Neste trabalho, métricas como consumo de energia, probabilidade de quedas de chamada por *handoff* e rendimento da rede foram utilizadas como parâmetros de desempenho.

Em [50] os autores apresentam um algoritmo baseado em PSMD para agenda-

mento de pacotes em redes banda larga sem fio. O algoritmo proposto utiliza o comprimento atual da fila do sistema e o tempo gasto por um pacote nesta mesma fila, de tal forma que seja minimizado o atraso médio dos pacotes. Nesse caso, métricas como vazão de dados, atraso máximo e médio de pacotes foram tratados para a análise de desempenho do algoritmo.

Em [51] os autores propõem um método para alocação de largura de banda e gerenciamento de *buffer* para redes celulares baseado em PSMD utilizando técnica de aprendizado por reforço para resolução do mesmo. Tal método cria um número definido de classes de serviço onde cada classe possui uma quantidade mínima de largura de banda e requisitos pré-definidos de QoS. Métricas tais como taxa de queda por *handoff* e taxa média de dados foram analisadas para demonstrar a efetividade do método.

Nos trabalhos apresentados, os processos Markoviano têm se mostrado uma ferramenta adequada para a análise da gerência de recursos e análise de desempenho de sistemas em telecomunicações. A sua aplicação em sistemas de rede sem fio e rede cabeada mostra a sua viabilidade e indica a sua adequação para a resolução dos problemas apontados nesta Tese.

1.4 Contribuição

Esta Tese apresenta uma metodologia para avaliação de desempenho em redes de acesso banda larga, em particular para redes ADSL2+ e FBWN. Esta metodologia é baseada em dois aspectos básicos: medições e modelagem.

O primeiro aspecto diz respeito a obtenção de dados através de medições de uma rede real ou simulada em laboratório. Através de campanhas de medições com objetivos bem definidos é possível obter informações significativas a respeito do comportamento de parâmetros físicos relacionados ao desempenho da rede.

A obtenção do comportamento de tais parâmetros permite que, em um passo seguinte, simuladores de rede sejam utilizados a fim de extrapolar as situações analisadas e assim prever o comportamento da rede frente a situações ou cenários específicos.

O segundo aspecto está relacionado à modelagem do sistema. Tal modelagem permite que, através de ferramentas matemáticas, seja possível analisar e estabelecer formas ótimas de utilização da rede. Nesta Tese são utilizados os conceitos relacionados à Teoria de Markov, a qual permite o desenvolvimento de políticas ótimas de alocação de recursos nos sistemas analisados: redes ADSL2+ e FBWN.

Estas políticas ótimas podem vir a ser embutidas em dispositivos voltados especificamente para gerência da rede de tais sistemas ou implementadas em programas de gerenciamento de rede, permitindo assim uma flexibilização maior em termos de alcance e eficácia destas soluções.

As redes ADSL2+, apesar de não serem uma das integrantes mais recentes da família DSL, juntamente com a sua versão anterior (ADSL) possuem expressiva participação do mercado brasileiro (no final de 2010, 30% de todo o acesso banda larga realizado [13]). Daí sua escolha, para esta Tese, como tecnologia de acesso cabeada a ser analisada. Com as premissas apresentadas nesta Tese, esta metodologia de avaliação de desempenho pode ser expandida também para cenários VDSL/VDSL2.

As contribuições principais desta Tese são:

- Estabelecimento de cenários de medições para análise de tráfego em redes de acesso cabeada (ADSL2+) e sem fio (FBWN). Estes cenários permitem que parâmetros físicos que são característicos da rede sejam coletados e analisados a fim de determinar a melhor forma de utilização das redes analisadas;
- Indicação de utilização de ferramentas computacionais em conjunto com equipamentos de medição, de tal forma que os exemplos indicados para um cenário possam ser utilizados em outras configurações semelhantes ou em outros tipos de redes de acesso;
- Modelagem via teoria Markoviana dos sistemas analisados, onde os diferentes tipos de tráfego com características específicas são analisados e modelados. Esta modelagem permite que os recursos dos sistemas sejam melhor aproveitados, ou seja, a utilização dos recursos disponíveis é garantida em níveis satisfatórios. O resultado prático desta modelagem permite uma maior flexibilidade de implementação nas plataformas computacionais que podem vir a ser utilizadas, ocasionando uma maior abrangência da solução apresentada;
- Aspectos práticos de implantação da modelagem realizada em redes ADSL2+ e FBWNs são analisados e discutidos, abordando alguns problemas comumente encontrados na utilização e gerência destas redes.

Adicionalmente, os estudos e resultados desta Tese foram também apresentados nos congressos/conferências ou estão contidos nos relatórios técnicos e capítulo de livro detalhados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Publicações relacionadas a esta Tese.

Publicação	Tipo	Ano
Radio Resource Management on Fixed Broadband Wireless Networks [52]	Capítulo de Livro (Horizons in Computer Science Research)	2012
6th Quarterly Report – Q6 (UFA07) [53]	Relatório UFPA–Ericsson (Documento Reservado)	2010
5th Quarterly Report – Q5 (UFA07) [54]	Relatório UFPA–Ericsson (Documento Reservado)	2010
Multimedia Transmission on Amazon Region using Wireless Broadband Networks [55]	IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting	2009
Multimedia Transmission over Optic, DSL and PLC Systems [56]	3rd IEEE International Workshop on Broadband Convergence Networks	2008
Triple Play Service under the Impact of Non Stationary Noise in a DSL System: an Amazon Approach [57]	Broadband Access Communication Technologies Conference – SPIE	2007
Impulsive Noise Impact on ADSL2+ Systems [58]	XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações	2007
Impact of Non-Stationary Noise on xDSL Systems: an Experimental Analysis [59]	Noise and Fluctuations in Photonics, Quantum Optics, and Communications Conference	2007
MDP-based Resource Allocation for Triple-Play Transmission on xDSL Systems [60]	Broadband Access Communication Technologies Conference – SPIE	2007
4th Quarterly Report – Q4 (UFA05) [61]	Relatório UFPA–Ericsson (Documento Reservado)	2007
3rd Quarterly Report – Q3 (UFA05) [62]	Relatório UFPA–Ericsson (Documento Reservado)	2007
2nd Quarterly Report – Q2 (UFA05) [63]	Relatório UFPA–Ericsson (Documento Reservado)	2007

1.5 Organização da Tese

O Capítulo 2 apresenta uma revisão conceitual a respeito dos pontos teóricos fundamentais relacionados a esta Tese, a saber: tecnologias de acesso banda larga; medidas e modelagem via processos de Markov. Nas Seções 2.1 e 2.2 as tecnologias de acesso banda larga analisadas, ADSL2+ e FBWW, são abordadas, respectivamente. Ambas as tecnologias são utilizadas como exemplo de aplicação desta metodologia. Nas Seções 2.3 e 2.4 são apresentados os conceitos relacionados a medidas e a modelagem utilizando processos de Markov, respectivamente.

O Capítulo 3 consiste da apresentação da metodologia para avaliação de desempenho baseada em dois aspectos: medidas e modelagem. A Seção 3.1 apresenta o conjunto de medidas relacionadas as redes ADSL2+ e FBWN. A Seção 3.2 apresenta

a modelagem realizada utilizando procesos Markovianos para tais redes.

O Capítulo 4 apresenta os resultados numéricos obtidos com as medições realizadas e com as modelagens propostas para cada rede analisada.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões sobre os resultados obtidos com esta metodologia para avaliação de desempenho e apresenta ainda propostas de continuação desta linha de pesquisa em trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Conceitual

Este capítulo apresenta uma revisão dos conceitos básicos relacionados a tecnologias de acesso banda larga, em particular sistemas DSL e redes FBWN. São apresentados ainda conceitos relacionados às formas de avaliação de desempenho abordadas nesta Tese: medidas e modelagem.

2.1 Tecnologias de Acesso: Sistemas DSL

2.1.1 Introdução

As tecnologias DSL (Digital Subscriber Line - linha digital do assinante) propiciam taxas razoavelmente altas (de 6 Mbps até 100 Mbps) de transmissão de dados utilizando para isso a rede telefônica metálica existente, sem a exclusão dos serviços tradicionais de transmissão de voz.

Apesar da crescente utilização de fibras ópticas e de arquiteturas tais como fibra até o armário (FTTC – Fiber To The Cabinet) e fibra até o usuário (FTTH – Fiber To The Home), o uso de pares metálicos para transmissão de dados ainda encontra nichos bem vantajosos de utilização em termos de custo, em particular, em soluções de última milha tanto para usuários domésticos quanto usuários corporativos.

As tecnologias DSL mais recentes, VDSL e VDSL2 (detalhadas a seguir), operam em enlaces curtos na ordem de centenas de metros e, em geral, possibilitam a comunicação entre o armário da rua e o equipamento DSL do usuário.

Além das velocidades relativamente altas já alcançadas, o uso de novas técnicas de mitigação de ruído, tal como o VDSL *vectoring*, e de técnicas de transmissão de dados utilizando mais de um par metálico, tal como a transmissão em modo fantasma (*phantom mode transmission*) e o VDSL *bonding*, permite o alcance de taxas na ordem de 100 Mbps e 400 Mpbs, respectivamente [64].

O termo DSL cobre uma série de tecnologias que possuem o mesmo princípio de

operação e que são resumidas na Tabela 2.1 [65]. Os termos *downstream* e *upstream* significam a comunicação entre a central telefônica e o assinante e entre o assinante e a central telefônica, respectivamente.

Tabela 2.1: Resumo das tecnologias DSL.

Tecnologia	Significado	Taxas
ADSL	Asymmetric DSL - linha digital do assinante assimétrica	6 Mbps (downstream), 800 kbps (upstream)
ADSL2	ADSL2	8 Mbps (downstream), 1 Mbps (upstream)
ADSL2+	ADSL2+	24 Mbps (downstream), 1 Mbps (upstream)
ADSL2-RE	ADSL Reach Extended - ADSL Alcance Estendido	8 Mbps (downstream), 1 Mbps (upstream)
SHDSL	Symmetric High-Bit Rate DSL - linha digital do assinante simétrica a alta taxa de bits	5,6 Mbps (downstream/upstream)
VDSL	Very-high-data-rate DSL - linha digital do assinante de alta taxa de dados	55 Mbps (downstream), 15 Mbps (upstream)
VDSL2 - 12 MHz long reach	VDSL 2 Alcance Longo	55 Mbps (downstream), 30 Mbps (upstream)
VDSL2 - 30 MHz short reach	VDSL 2 Alcance Curto	100 Mbps (downstream/upstream)

2.1.2 ADSL

O ADSL (Asymmetric DSL - linha digital do assinante assimétrica) começou a ser desenvolvido no início da década de 90 e a sua primeira versão comercial ocorreu em 1995. Em 1998, o ITU (International Telecommunication Union - união internacional de telecomunicações) aprovou um conjunto de recomendações para ADSL, chamado Recomendação G.992.1 [66]. Este conjunto de recomendações é praticamente idêntico à recomendação ANSI (American National Standards Institute - instituto americano de padronização) T1.413 versão 2.

O modelo de referência para um sistema ADSL é definido pela norma ANSI T1.413 e pelo relatório técnico TR-001 do Broadband Forum (antigo DSL Fórum). Tal modelo é apresentado na Figura 2.1 [67]. As abreviaturas utilizadas são detalhadas na Tabela 2.2.

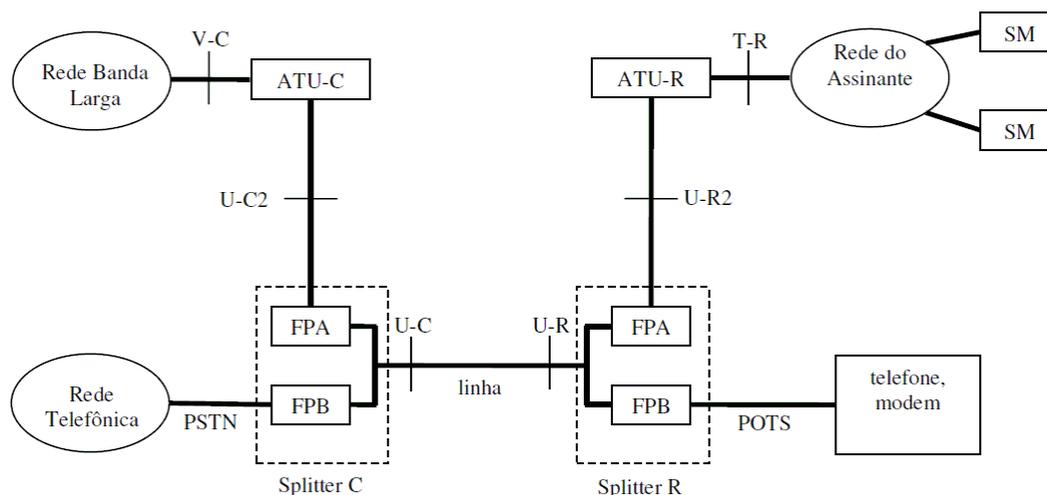


Figura 2.1: Modelo de referência para um sistema ADSL.

Tabela 2.2: Siglas utilizadas no modelo ADSL.

Sigla	Significado
ATU-C	Unidade transmissora ADSL na central telefônica
ATU-R	Unidade transmissora ADSL no usuário
FPA	Filtro passa altas frequências
FPB	Filtro passa baixas frequências
POTS	Planta de serviço telefônico (Plain Old Telephone Service)
PSTN	Rede de serviço telefônico (Public Switched Telephone Network)
SM	Módulo de Serviço (Service Module), tais como roteadores, PCs, etc.
T-R	Interface entre ATU-R e rede do assinante
U-C	Interface entre a linha e o splitter C
U-C2	Interface entre o ATU-C e o splitter C
U-R	Interface entre a linha e o splitter R
U-R2	Interface entre o ATU-R e o splitter R
V-C	Interface entre o ATU-C e a rede banda larga

Nesse modelo são especificados em termos gerais os componentes necessários (mas não obrigatórios) para um sistema ADSL. Os sinais ADSL e telefônico são transmitidos conjuntamente, sendo que a separação dos mesmos é realizada através de um filtro passa alta (sinal ADSL) e de um filtro passa baixa (sinal telefônico). Tais filtros são comumente conhecidos como *splitters* e podem ser integrados as ATUs.

2.1.3 ADSL2/ADSL2+

Desde o desenvolvimento do ADSL, uma série de outras especificações da padronização de sistemas DSL foram feitas a fim de melhorar o desempenho de tais sistemas.

As redes ADSL2+ são grandemente utilizadas na América Latina, em particular, no Brasil. Daí sua análise, tanto por medidas quanto por modelagem, nesta Tese.

Esta melhoria de desempenho em sistemas ADSL incluiu o aumento da taxa de dados alcançada e a melhor atuação da gerência da rede [68]. As melhorias relacionadas à recomendação G.992.1 [66] foram condensadas nas recomendações G.992.3 [69] e G.992.5 [70], sistemas ADSL2 e ADSL2+, respectivamente. A seguir, um resumo das principais características destes sistemas [68]:

- Inclusão de constelação de bits para um desempenho mais robusto em enlaces mais longos e inclusão (agora de uso obrigatório) de codificação Trellis;
- Aperfeiçoamento nas codificações de erro até então utilizadas;
- Alteração nos procedimentos inicialização de modems e DSLAMs, a fim de tornar mais rápida a inicialização dos dispositivos envolvidos;
- Inclusão de uma taxa de adaptação sem interrupções (SRA – Seamless Rate Adaptation), onde o modem, ao detectar a presença de níveis alterados de *crosstalk* ou outro tipo de interferência, possui capacidade de alterar as características de transmissão sem a interrupção total dos serviços. Se os níveis detectados de interferência forem acima da capacidade de recuperação do modem, haverá interrupção da transmissão;
- Adoção de um modo opcional *all digital*, o qual permite o uso, pelo modem, de toda a banda POTS para a transmissão de dados;
- Extensão do limite superior da banda de frequências para *downstream* dos originais 1,1 MHz para 2,2 MHz. Isto resultou em uma maior taxa de dados para *downstream*.

2.1.4 VDSL/VDSL2

VDSL e VDSL2 são as tecnologias mais atuais da família DSL, as quais permitem taxas de *downstream* e *upstream* na ordem de Mbps e possibilitam o uso de aplicações que necessitem de taxas de dados elevadas, tais como tráfego multimídia, vídeo por demanda, telemedicina, entre outros. Estas tecnologias são padronizadas pelas recomendações ITU-T G.993.1 [71] e G.993.2 [72], respectivamente.

As tecnologias VDSL e VDSL2 são uma extensão das tecnologias ADSL2 e ADSL2+, mas os enlaces utilizados são mais curtos, chegando a ordem de centenas de metros (100 m a 500 m) [68].

Estas tecnologias são utilizadas juntamente com enlaces de fibras ópticas. Os enlaces de fibras ópticas chegam até um armário da rua (arquitetura FTTC), e a partir daí, a transmissão até a residência do usuário ou escritório se dá pelo uso de cabos metálicos de par trançado convencionais.

VDSL e VDSL2 podem suportar taxas simétricas e assimétricas. Similar ao ADSL, as tecnologias VDSL e VDSL2 podem operar em conjunto com transmissões POTS ou ISDN [68].

2.1.5 Novas Tecnologias em Redes DSL

Apesar das taxas alcançadas pelas tecnologias VDSL e VDSL2, existem esforços de fabricantes (Ericsson e Alcatel-Lucent, por exemplo), buscando aumentar ainda mais a utilização dos cabos metálicos de par trançados.

Esta sobrevida do cabo de par trançado é explicada pelo motivo econômico. Apesar de todos os avanços tecnológicos na fabricação e utilização de fibras ópticas, ainda é mais barato se chegar ao usuário final via cabo metálico telefônico [64], o qual muitas vezes já está instalado, em vez se usar uma arquitetura FTTH.

VDSL2 Bonding

Um avanço tecnológico para os sistemas DSL é o *VDSL2 Bonding*, onde mais de 1 par de cabo de par trançado (em geral 2 pares para usuários domésticos e até 8 pares para usuários corporativos) é utilizado para se chegar a taxas de dados próximas a 400 Mbps em distâncias na ordem de 500 m [64] [73]. O *VDSL2 Bonding* é aplicável tanto para o tráfego de *downstream* quanto para o tráfego de *upstream*.

A ideia básica por trás do *DSL Bonding* é utilizar mais pares de cabo de par trançado para o transporte da informação. A Figura 2.2 apresenta a configuração geral de utilização desta tecnologia.

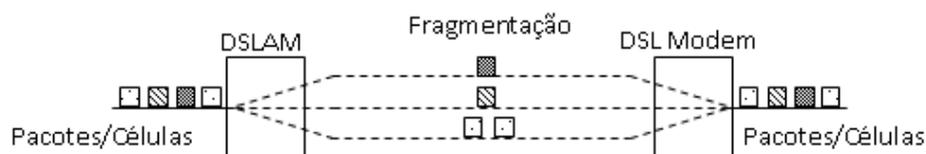


Figura 2.2: Configuração geral para um sistema *DSL Bonding*.

Apesar de não ser o mais comum, o *DSL Bonding* também pode ser aplicado a redes ADSL2+. Desta forma, há duas implementações básicas [74]:

- Baseada em células de modo de transferência assíncrono (ATM – Asynchronous Transfer Mode), usada principalmente para redes ADSL2+;
- Baseada em pacotes Ethernet, também conhecida como modo de transferência de pacotes (PTM – Packet Transfer Mode), usada em redes VDSL.

As abordagens ATM *Bonding* e PMT *Bonding* são padronizadas pelas recomendações ITU-T G.998.1 [75] e G.998.2 [76], respectivamente. Em ambos os casos, a transmissão de pacotes/células entre CO-CPE é fragmentada entre todos os caminhos disponíveis. No receptor, é feita a remontagem para recuperação dos dados originais.

Adicionalmente, ainda há a recomendação ITU-T G.998.3 [77], a qual descreve uma solução de *Bonding* para múltiplas linhas DSL usando Multiplexação Inversa por Divisão do Tempo (TDIM – Time-Division Inverse Multiplexing).

VDSL2 Vectoring

Outra solução tecnológica para aumento da capacidade do par trançado é o *VDSL2 Vectoring*, onde o *crosstalk* gerado entre as linhas de um cabo é eliminado ou atenuado, de tal forma que a vazão de dados obtida é substancialmente elevada. Neste caso, é feita uma coordenação dos equipamentos transmissores existentes em um cabo de par trançado, a fim de reduzir o *crosstalk* gerado e aumentar o desempenho global do sistema [78].

O *VDSL2 Vectoring* é uma solução de gerenciamento dinâmico de espectro nível 3 (DSM – Dynamic Spectrum Management), a qual é padronizada pela recomendação ITU-T G.993.5 [79]. O *Vectoring* pode ser aplicado tanto no tráfego de *downstream* quanto no tráfego de *upstream*. Esta técnica de cancelamento de *crosstalk* é particularmente eficaz para enlaces DSL curtos (menores que 1 km) [79]. Entretanto, quando um cabo (*binder*) é compartilhado por mais de uma operadora, a redução de *crosstalk* usando o *Vectoring* é reduzida, visto a dificuldade de implantação de uma gerência centralizada para todas as linhas.

Tendo a possibilidade de utilização conjunta com o *VDSL2 Bonding*, a integração destas duas técnicas permitirá o alcance de taxas de dados mais elevadas do que as atuais. Por exemplo, a Alcatel-Lucent simula taxas de dados para tráfego *downstream* de até cerca de 700 Mbps em enlaces de 500 m (simulação para uma configuração de 8 pares utilizando *bonding+vectoring*) [73].

Phantom Mode

O *Phantom Mode*, ou modo de transmissão fantasma, é uma forma de transmissão considerando, pelo menos, o uso de dois pares trançados. Esta configuração de cabos é também chamada de cabo *quad*.

As redes DSL atuais consideram, inicialmente, a utilização de apenas um único par trançado chegando ao usuário final. Entretanto, a utilização de dois ou mais pares (tecnologia VDSL2 *Bonding*) possibilita o alcance de taxas de dados mais altas, tal como visto nas seções anteriores.

O *Phantom Mode* considera a utilização de 02 dois pares de par trançado. Em cada par, um sinal de modo diferencial é utilizado para transmissão de dados. Adicionalmente, há um terceiro sinal diferencial chamado modo fantasma (*phantom mode*). Este terceiro sinal, cujo valor depende dos dois primeiros, possibilita que dados adicionais sejam transportados no enlace DSL, aumentando assim a capacidade do sistema [80].

A combinação destas técnicas (*Bonding*, *Vectoring* e *Phantom Mode*) juntamente com novas melhorias do padrão DSL traz a possibilidade que taxas próximas a 1 Gbps sejam alcançadas para enlaces na ordem de centenas de metros, possibilitando assim uma longa sobrevida para os sistemas DSL.

G.Fast

Uma tentativa de aprimoramento das redes DSL é a padrão G.Fast, o qual objetiva aumentar a capacidade de utilização dos cabos de par trançado através, entre outras abordagens, do aumento da faixa de frequência de operação dos sistemas DSL.

Também conhecido como a quarta geração de sistemas banda larga (4GBB), o G.Fast sinaliza a utilização de enlaces menores (50 m a 300 m), e com isso, o aumento da frequência de operação para 100 MHz, podendo chegar até 300 MHz [78].

Com o intuito de ser utilizado em sistemas híbridos *fibra óptica-par trançado*, o G.Fast indica que a utilização dos cabos metálicos como forma de acesso a redes banda largas será ainda uma realidade pelos próximos anos.

2.1.6 Ruídos em Redes DSL

Uma vez que os sistemas DSL utilizam como meio de transmissão cabos metálicos, esta tecnologia é susceptível a uma série de fatores que comprometem o seu desempenho ou até mesmo impedem uma adequada transmissão de dados.

Ruído Branco

O ruído branco é proveniente da agitação térmica dos elétrons componentes do material do par metálico, e por isso, sempre presente durante a transmissão em um sistema DSL. O ruído branco n é caracterizado por uma densidade espectral de potência $G_n(f)$ plana ou constante sobre todas as frequências, ou seja,

$$G_n(f) = \frac{n}{2} = \text{constante}. \quad (2.1)$$

O fator $\frac{1}{2}$ indica que metade da potência é associada com frequências positivas e a outra metade com frequências negativas [81].

Se o ruído branco é aplicado na entrada de um sistema linear com função de transferência $H(f)$, a densidade espectral de potência de saída do ruído $G_0(f)$ será dada por [81]:

$$G_0(f) = |H(f)|^2 G_n(f) = \frac{n}{2} |H(f)|^2. \quad (2.2)$$

Desta forma, a potência de saída do ruído N_0 será dada por [81]:

$$N_0 = \int_{-\infty}^{\infty} G_0(f) df. \quad (2.3)$$

Crosstalk

O *crosstalk* surge do acoplamento indutivo existente quando são transmitidos sinais elétricos nos pares metálicos de um mesmo cabo (ou *binder*). Tal acoplamento é o principal fator de limitação da taxa de bits e da distância alcançada em sistemas DSL [67] [82].

O entrelaçamento dos cabos metálicos entre si tem por objetivo reduzir tal acoplamento e com isso melhorar o desempenho do sistema [67]. Existem dois tipos de *crosstalk*: o Next e Fext.

O Next (*Near-end crosstalk*) é o maior impedimento para sistemas que compartilham a mesma banda de frequência entre o *upstream* e o *downstream* [67]. O Next é o ruído percebido pelo receptor localizado na mesma extremidade do cabo onde um dado transmissor é a fonte de ruído (vide Figura 2.3). O Next pode ser minimizado utilizando diferentes bandas de frequência para *upstream* e *downstream*.

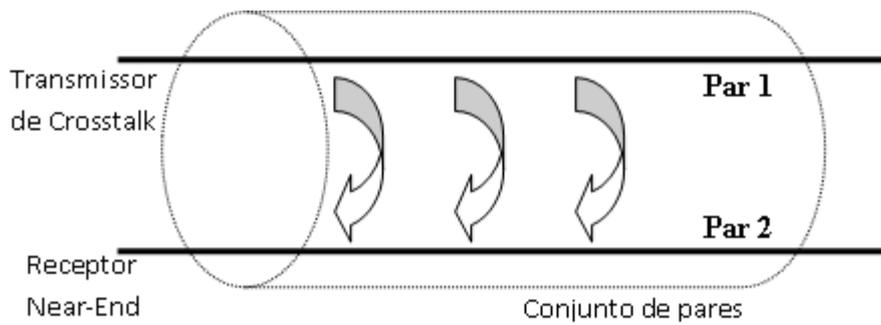


Figura 2.3: Exemplo de ruído Next.

O Fext (*Far-end crosstalk*) é o ruído detectado pelo receptor localizado na extremidade mais distante do transmissor que é a fonte de ruído (vide Figura 2.4). O Fext é menos prejudicial que o Next devido ao mesmo ser atenuado em razão da distância que tal ruído precisa percorrer para chegar ao receptor.

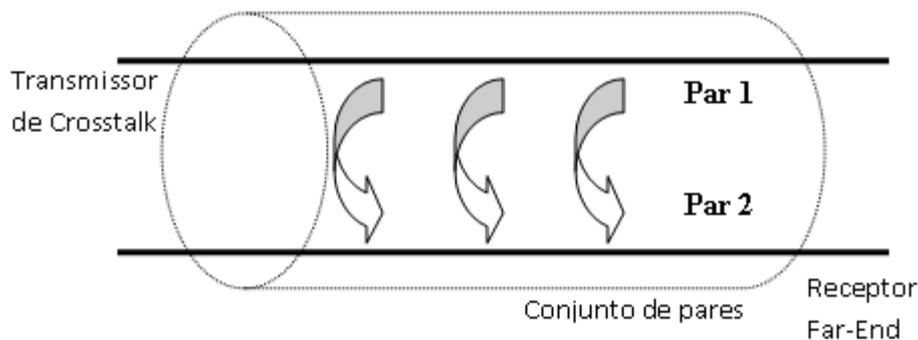


Figura 2.4: Exemplo de ruído Fext.

Técnicas como o DSM buscam uma forma controlada de injeção de espectro em sistemas DSL, de tal maneira que o *crosstalk* resultante assumam valores aceitáveis do ponto de vista de desempenho [83].

Ruído Impulsivo

O ruído impulsivo é uma interferência eletromagnética não estacionária que consiste de ocorrências aleatórias de rajadas de ruídos com amplitude e intervalos de ocorrência também aleatórios [67] [84].

As fontes de ruído impulsivo são as mais diversas possíveis e incluem ignição de motores elétricos, controle de voltagem de elevadores, dispositivos elétricos domésticos e industriais, etc.

A sua natureza aleatória e não estacionária faz com que o ruído impulsivo seja de difícil modelagem e predição. Técnicas como correção de erros no receptor (FEC –

Forward Error Correction) e *Interleave* tentam minimizar o impacto do ruído impulsivo na transmissão de sistemas DSL. Tais técnicas serão detalhadas a seguir.

Ruído de Rádio

O ruído de rádio é proveniente de transmissões de rádio AM e de rádios amadores. Como os cabos metálicos trançados possuem as características de uma antena, os sinais de rádio induzem energia eletromagnética e com isso geram ruído [67].

As bandas de rádio AM se estendem de 560 kHz até 1,6 MHz, o que se sobrepõe às bandas de ADSL e VDSL [82]. Já as bandas de frequência de rádio amador podem ir de 1,8 MHz a 29,7 MHz [67], e por isso tais emissões são mais danosas a sistemas VDSL.

Técnicas de Tratamento / Mitigação de Erros

Verificação de Redundância Cíclica (CRC – Cyclic Redundancy Check)

Esta técnica de detecção de erros é implementada separadamente tanto para o caminho rápido quanto para o caminho com *interleave*. Nesta técnica, um determinado número de bits por *buffer* é gerado, para cada superquadro de 68 quadros. Os bits de CRC são então transmitidos no primeiro quadro do superquadro seguinte [67].

As tecnologias ADSL e ADSL-LITE (que utiliza a recomendação ITU G.922.2 [85], a qual especifica um sistema ADSL sem a utilização de *splitter* na POTS) utilizam um CRC de 8 bits para o estado normal de operação e um CRC de 16 bits para os estados de inicialização do enlace de transmissão [67].

Usualmente as violações de CRC, que correspondem a erros detectados, são utilizadas por funções de manutenção de alto nível para diagnosticar ou reinicializar o enlace DSL. Através do CRC é possível detectar erros que não são corrigidos pela codificação Reed-Solomon [84].

Embaralhador (scramblers)

Embaralhadores são utilizados em transmissão de dados com o objetivo de tornar o mais aleatório possível o conjunto de dados transmitidos. Desta forma, evitam-se sequências danosas de 0s ou 1s na transmissão e faz-se com que as técnicas de processamento digital do sinal sejam assim mais robustas.

Equalizadores e canceladores de eco são alguns dos sistemas que utilizam o processo de embaralhamento durante o processo de funcionamento.

A ideia básica do embaralhador é transformar uma sequência de dados em um conjunto de bits aleatórios e depois desembaralhá-los na recepção. Tal como para o CRC, há um embaralhador para cada caminho existente (caminho rápido e com *interleave*).

Existem dois tipos de embaralhadores: síncronos e auto-sincronizados. Os embaralhadores síncronos adicionam uma sequência pseudo-aleatória a fim de prevenir longas sequências de 1s ou 0s. O desembaralhador adiciona a mesma sequência pseudo-aleatória, no instante de tempo correspondente ao realizado pelo embaralhador, a fim de recuperar os dados originais. Desta forma, o embaralhador e o desembaralhador síncrono devem estabelecer alguma forma de marcação do tempo, ou então tal sistema terá uma eficiência muito baixa.

Já no embaralhador auto-sincronizado, a cadeia de saída de bits é processada por um filtro binário. O desembaralhador usa então um filtro similar para recuperar os dados originais. Esta cascata de dois filtros é exatamente a reprodução da entrada, não importando o atraso existente entre transmissor e receptor [67].

Sistemas ADSL utilizam um tipo denominado embaralhador auto-sincronizado de 23 bits, evitando desta forma a necessidade de qualquer quadro ou símbolo de sincronização [84].

Correção de Erros no Receptor (FEC)

A codificação Reed-Solomon (RS) é utilizada para a implementação de FEC em sistemas ADSL [67] [84]. Tal codificação é extremamente popular em comunicações de dados devido a sua grande capacidade de detectar rajadas de erros em um canal de transmissão.

O codificador RS adiciona a um bloco de dados uma determinada quantidade de símbolos extras redundantes. O decodificador RS, ao decodificar cada bloco e detectar e ocorrência de erros, consegue na maior parte dos casos recuperar os dados originais a partir do conjunto de dados decodificados.

Os códigos RS são usualmente especificados em termos de RS (n, k) com s bits por símbolo, sendo n o tamanho total do código RS e k o número de blocos de dados. Isto significa que o codificador utiliza k blocos de dados com s bits para cada bloco e adiciona $(n - k)$ símbolos de paridade a fim de criar uma palavra de código. Isto é ilustrado através da Figura 2.5.

Em sistemas ADSL o número de blocos de dados e o tamanho da palavra de código podem variar dependendo da estrutura de quadros ADSL utilizada. Um código

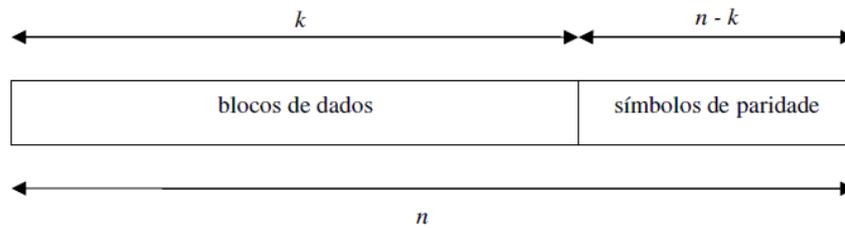


Figura 2.5: Estrutura de código Reed-Solomon.

bastante popular é o RS (255, 223) com 8 bits por símbolo. Para este código, cada palavra código contém 255 *bytes*, dos quais 223 *bytes* são conjuntos de dados e os 32 *bytes* restantes são símbolos de paridade redundantes.

A aritmética da codificação RS executa as operações de polinômios em um campo de Galois algébrico finito de 256 elementos $GF(256)$ e permite que até 16 *bytes* incorretos em uma palavra código de 255 *bytes* sejam corrigidos [67].

Caso o número de símbolos errados ultrapasse o limite de 16 *bytes* incorretos, o código RS detectará esta situação e informará ao sistema que não foi capaz de corrigir todos os erros.

Interleave

O processo de *interleave* consiste de uma reorganização dos *bytes* transmitidos sobre um bloco L de palavras de código, de tal forma que os *bytes* adjacentes em um conjunto de dados transmitidos não são da mesma palavra de código [67]. O processo de reorganização dos *bytes* ocorre no receptor.

Existem basicamente dois tipos de processo de *interleave*: convolucional e de blocos. O *interleave* convolucional intercala *bytes* associados a símbolos que podem pertencer a segmentos de dados distintos. O *interleave* de blocos intercala *bytes* associados a símbolos pertencentes ao mesmo segmento de dados. O *interleave* convolucional possui as vantagens de requerer menos memória e impor um atraso menor em relação ao *interleave* de blocos [84].

Erros causados por distúrbios impulsivos são concentrados em rajadas de bits ou *bytes*. Como os dados que são transmitidos em conjunto pertencem a diferentes palavras de código, o processo de *interleave* faz com que os erros existentes durante a transmissão sejam espalhados através dos conjuntos de dados transmitidos. Tal fato permite que a codificação RS tenha um desempenho muito melhor na recuperação dos dados.

É importante notar que como resultado das técnicas de correção e mitigação de erros o caminho com *interleave* vai sofrer um atraso, em relação ao caminho sem

interleave, no receptor [84].

2.2 Tecnologias de Acesso: FBWNs

2.2.1 Introdução

FBWNs são um tipo de sistema de rede sem fio baseado em uma ou mais estações rádio base (BS – Base Station) provendo cobertura sobre uma dada área, as quais se comunicam com os equipamentos do usuário (CPE – Customer Premises Equipment).

Cada BS pode providenciar uma comunicação baseada em três formas básicas: transmissão ponto a ponto (PP – Point to Point); transmissão ponto-multiponto (PMP – Point to Multipoint); transmissão em malha (*mesh*, como é mais conhecida).

O principal ponto que diferencia este tipo de rede sobre as demais redes sem fio é que não é considerado que os terminais de acesso tenham mobilidade, ou seja, os CPEs permanecem fixos durante toda a operação do sistema.

Estes tipos de sistemas também são conhecidos pela nomenclatura de *sistemas nomádicos*, ou seja, os CPEs podem se mover livremente dentro da área de cobertura de uma BS, mas quando em uso devem permanecer estacionários.

Embora a falta de mobilidade dos CPEs possa parecer uma desvantagem inicial, esta característica é apropriada para alguns tipos de redes, tais como sistemas que permitem o acesso de agências ou órgãos públicos localizadas em prédios ou pontos fixos. Pode-se citar, por exemplo, escolas, hospitais, sedes de prefeitura, secretarias municipais, etc.

Comunicações PP são baseadas em uma topologia na qual um enlace de rádio dedicado é mantido entre duas estações. Aplicações típicas desta topologia incluem a conectividade entre prédios de uma empresa ou de uma universidade através de enlaces de rádio de alta capacidade.

Comunicações PMP, por sua vez, são baseadas em uma topologia na qual uma ou mais BSs, também chamadas de *clusters*, oferecem conexão a múltiplos CPEs espalhados geograficamente em uma área. Cada CPE é permanentemente associado a uma única BS.

Aplicações típicas de uso desta topologia são: acesso banda larga para residências, pequenos escritórios e empresas de médio porte; acesso a enlaces E1 para organizações governamentais (escolas, hospitais) ou organizações privadas; enlace para ponto de acesso sem fio (*wi-fi hotspots*) [86]. Uma topologia típica PMP é mostrada na Figura 2.6.

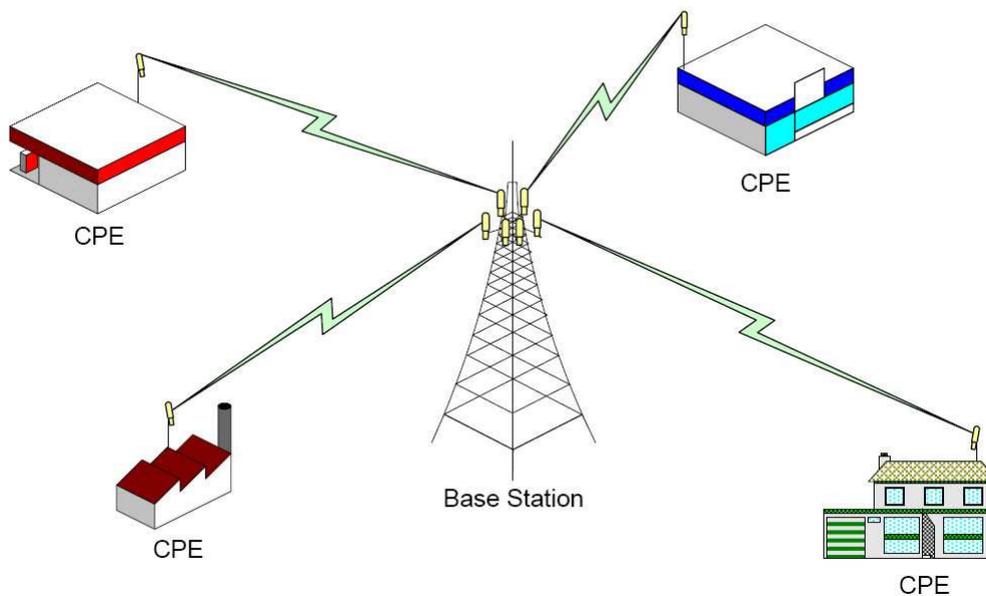


Figura 2.6: Exemplo de topologia ponto-multiponto típica.

Um sistema PMP compreende BSs, CPEs e, em alguns casos, estações repetidoras (RS – Repeater Station). BSs utilizam antenas de feixe relativamente largo, divididas em um ou mais setores, providenciando assim uma cobertura de até 360 °.

Para conseguir uma cobertura completa em uma dada área, mais de uma BS pode ser necessária. Os CPEs de um setor recebem a mesma transmissão em difusão (*broadcast*) feita pela BS no enlace de descida (*downlink*). Cada CPE captura e processa o tráfego endereçado a si. Os enlaces de descida e subida (*downlink* e *uplink*, respectivamente) são duplexados utilizando uma das seguintes técnicas: duplexação por divisão de frequência (FDD – Frequency Division Duplexing) ou duplexação por divisão de tempo (TDD – Time Division Duplexing) [86].

Sistemas em malha possuem a mesma funcionalidade dos sistemas PMP. BSs fornecem conexões ao núcleo da rede de um lado e conexões a outras estações por outro lado. Um CPE pode ser um terminal de rádio ou uma RS. O tráfego pode passar por uma ou mais RSs até chegar a uma BS [87].

A faixa de aplicações de uma FBWN é bem diversificada. Apesar de não suportar mobilidade em seus CPEs, as aplicações de uma FBWN podem incluir transmissão de vídeo, VoIP, dados, serviços de governança eletrônica, educação a distância, entretenimento, telemedicina, entre outros.

Cada usuário pode requerer um conjunto específico de serviços e isto pode mudar rapidamente da mesma forma que as conexões são estabelecidas e encerradas. O fluxo de tráfego pode ser unidirecional, assimétrico ou simétrico, mudando dinamicamente

com o tempo.

A FBWN oferece uma série de vantagens como solução para conexão da última milha em relação às tradicionais conexões cabeadas, tais como DSL e redes de fibras ópticas. Estas vantagens incluem: um menor custo de entrada e implantação; maior rapidez e facilidade na entrada em operação e obtenção de receita; possibilidade de construção da rede de acordo com a demanda; menor custo operacional para manutenção, gerência e operação da rede; independência da infra-estrutura de operadoras já existentes na região [86].

Muitas FBWNs são baseadas no padrão IEEE 802.16, o qual teve a sua primeira versão publicada em 2004. No entanto, muitas companhias possuem equipamentos banda larga sem fio utilizando tecnologias proprietárias desde 1990, e vários destes produtos alegam ser baseados no padrão IEEE 802.16 [88].

Independentemente de utilizar ou não uma tecnologia proprietária, um importante aspecto para uma adequada transmissão multimídia em redes banda larga é o uso de CAC apropriado para assegurar níveis mínimos de QoS.

Uma vez que há um grande número de aplicações com diferentes requisitos de largura de banda, o CAC desempenha um papel crucial no provisionamento de QoS em redes sem fio banda larga, sejam elas fixas ou não [17] [18].

2.2.2 QoS em FBWNs

O padrão IEEE 802.16-2009 especifica a interface aérea para o tráfego de serviços multimídia em FBWNs operando com frequências abaixo de 11 GHz [87], incluindo detalhes sobre a camada de controle e acesso ao meio (MAC – Medium Access Control) e a camada física (PHY - Physical Layer).

As abordagens para tratamento a QoS do padrão IEEE 802.16 podem ser classificadas em duas fases: fase 1, indicada pelo padrão IEEE 802.16e [89]; fase 2, indicada pelo padrão IEEE 802.16m [90].

Na fase 1, o IEEE 802.16e especifica 5 tipos de fluxo de serviço, a saber [89]:

- Concessão de serviço não-solicitado (UGS – Unsolicited Grant Service): suporta tráfego de tempo real com pacotes de dados de tamanho fixo gerados periodicamente, tais como serviços E1/T1 e e VoIP sem supressão de silêncio;
- Geração de serviços em tempo real (rtPS – Real-time Polling Service): suporta tráfego de tempo real com pacotes de dados de tamanho variável gerados periodicamente, tais como vídeos MPEG (Moving Pictures Experts Group - grupo

de especialistas em imagens com movimento);

- Geração de serviços estendidos em tempo real (ertPS – Extended rtPS): suporta tráfego de tempo real com pacotes de dados de tamanho variável gerados periodicamente com uma sequência de intervalos, ora ativos, ora sem tráfego, tais como VoIP com supressão de silêncio;
- Geração de serviços em tempo não-real (nrtPS – Non-real-time Polling Service): suporta tráfego tolerante a atraso que necessita de uma reserva mínima de taxa de dados. É similar os serviços rtPS, exceto que não há garantia de atraso máximo;
- Melhor esforço (BE – Best Effort): suporta tráfego regular de serviços de dados, tais como WWW e *e-mail*.

A disponibilidade de fluxos de serviços apresentada pelo IEEE.802.16e é satisfatória. Entretanto, os fluxos disponíveis em tal padrão não são eficientes para aplicações tais como [91]:

- Jogos *on-line*;
- VoIP com multitasas adaptativo de tamanho de pacotes variável;
- Skype, o qual apresenta padrão de tráfego variável;
- Serviços baseados no protocolo TCP que apresentam padrão de tráfego *on-off* com pacotes de dados de tamanhos variáveis.

A fase 2 é a geração mais recente da interface aérea do IEEE 802.16. A IEEE 802.16m fornece uma abordagem que busca o suporte a aplicações à Internet emergentes ou em desenvolvimento considerando a mobilidade dos CPEs [90].

Os novos aspectos estão relacionados a um novo serviço de agendamento e a um serviço de geração e concessão adaptativo (aGP – Adaptative Granting and Polling). Apesar da nova abordagem, o IEEE 802.16m possibilita o suporte ao IEEE 802.16e, fazendo com que redes que implementem as versões diferentes do padrão IEEE 802.16 possam coexistir normalmente.

Em ambas as fases, a camada MAC suporta uma arquitetura PMP, com uso opcional da tecnologia em malha. O padrão IEEE 802.16-2004 assume que o sistema está usando uma tecnologia PMP com uma única BS controlando vários CPEs. A BS

controla e gerencia todo o sistema e os CPEs possibilitam a interface entre o usuário final e a BS [92].

2.3 Avaliação de Desempenho: Medidas

2.3.1 Introdução

O que é exatamente um experimento? Segundo [93] um experimento é um ato no qual alguém fisicamente interfere em um processo sob investigação e grava os resultados desta interferência. Através desta interpretação, uma simulação computacional não é um experimento. Uma única observação de um processo não pode ser considerada um experimento. Utilizando um exemplo prático: um astrônomo observando o deslocamento dos planetas não faz um experimento, ele apenas observa o fenômeno.

Na realização de um experimento, é interessante identificar, ou pelo menos especular, todas ou a maioria das variáveis relacionadas ao processo. Variáveis são quantidades físicas envolvidas no processo sob investigação e que podem alterar seus valores durante o experimento, e assim, afetar o comportamento do mesmo. As variáveis podem ser classificadas como dependentes ou independentes [93]. Em geral, um experimentador manipula as variáveis independentes e analisa os efeitos nas variáveis dependentes.

Antes de se realizar um experimento, uma abordagem clara de como realizar este experimento deve ser concebida. O objetivo do experimento deve sempre estar relacionado com as concepções teóricas pertinentes. Algumas questões devem ter suas respostas bem definidas, ou pelo menos, devem ser observadas durante o processo experimental [93]:

- Quais são as suposições ou premissas adotadas durante o experimento?
- A teoria envolvida está bem compreendida?
- Todas as variáveis envolvidas estão identificadas?
- Quais variáveis podem ser controladas?
- O que irá ser gravado e como isto será feito?
- Quais são os resultados esperados?

É importante ter em mente que o processo deve ser observado com a mínima intervenção possível, pois o experimento em si já afeta o processo observado. Após o

experimento, os resultados devem então ser analisados. Se houver uma concordância entre os resultados experimentais e a teoria relacionada, os resultados devem ser reconfirmados. Se houver alguma discondância, tanto a teoria quanto o procedimento experimental devem ser examinados cuidadosamente.

Por fim, os resultados devem ser resumidos e, quando possível, apresentados juntamente com as incertezas obtidas e com as eventuais limitações teóricas e experimentais existentes. Tais informações devem ser apresentadas a fim de que outro investigador possa seguir o que foi descrito e repetir o que foi feito.

2.3.2 Classificação dos Experimentos

Existem várias maneiras de se classificar um experimento. Uma forma é de acordo com a intenção ou propósito do experimento. Através desta abordagem, pode-se classificar os experimentos como: variacional, validacional, pedagógico e exploratório [93].

Os experimentos **variacionais** têm por objetivo estabelecer, ou quantificar, as relações matemáticas existentes entre as variáveis contidas no experimento. Isto é feito variando-se uma ou mais variáveis e analisando-se os resultados. Experimentos envolvendo a determinação das propriedades de um material ou comportamento de um sistema são exemplos de experimentos variacionais.

Os experimentos **validacionais** são realizados a fim de validar uma hipótese específica. Eles servem para avaliar ou aperfeiçoar modelos teóricos já existentes.

Os experimentos **pedagógicos** são voltados para ensinar um principiante ou demonstrar algo já conhecido. Experimentos realizados nas escolas de ensino fundamental e médio são deste tipo.

Os experimentos **exploratórios** são realizados para explorar uma ideia ou uma possível teoria. Tais experimentos são baseados em algumas observações iniciais ou uma teoria simples. Nem todas as variáveis podem ser identificadas ou controladas. Tal experimento, usualmente, visa encontrar tendências nos dados coletados a fim de que seja possível desenvolver uma relação entre as variáveis.

2.3.3 Composição Geral de um Sistema de Medidas

Um sistema de medidas é composto por uma série de elementos voltados a possibilitar a realização de um procedimento experimental. Estes elementos, atuando em conjunto, possibilitam *sentir* uma variável física e prover uma resposta na forma de um sinal, permitindo ainda que seja possível condicioná-lo, processá-lo e armazená-lo.

O principal propósito de um sistema de medidas é produzir um valor numérico preciso da variável que está se medindo. Idealmente, o valor gravado deve ser um valor exato da variável física *sentida* pelo sistema. Na prática, um sistema de medições perfeito não existe ou mesmo não é necessário. Em geral, o resultado obtido deve ter somente um grau satisfatório de precisão a fim de obter um bom entendimento das características de resposta do sistema analisado [93].

Em linhas gerais, um sistema de medidas é composto por [93]:

- Variável Física: trata-se da característica física do sistema, a qual será coletada. Por exemplo, em um sistema de medidas térmicas para um elemento gasoso, pode-se considerar a temperatura como variável física;
- Sensor: dispositivo que percebe o estímulo físico e o converte em uma característica física. Para o sistema de exemplo, considera-se que a temperatura do gás resulta numa resistência elétrica para o sensor em questão;
- Transdutor: dispositivo que altera o sinal original (recebido pelo sensor) para um formato mais apropriado para a análise. Para o exemplo adotado, utilizando-se uma ponte de Wheatstone, pode-se obter uma tensão de saída proporcional à resistência obtida no sensor;
- Condicionador de Sinal: dispositivo que, em essência, altera a forma do sinal gerada pelo transdutor para análise pelo próximo elemento. Por exemplo, a tensão de saída do transdutor pode ser amplificada em valores adequados ao próximo estágio;
- Processador de Sinal: na maior parte das vezes, é necessário converter um sinal analógico em sinal digital. Neste módulo também se encontram os passos de gravação e armazenamento dos dados.

Dependendo do tipo de aplicação e da forma de implementação de um sistema de medidas, os módulos descritos anteriormente podem ser agrupados a fim de otimizar o processo de medidas para um dado ambiente.

2.4 Avaliação de Desempenho: Modelagem

2.4.1 Introdução

A ação de modelar um sistema, seja através de modelos físicos ou modelos matemáticos, possui algumas vantagens e características, as quais podem-se destacar:

- Os modelos, em geral, são versões simplificadas do objeto ou problema que representam. Esta simplificação permite uma análise mais rápida de aspectos que são objeto de estudo;
- A utilização de modelos permite uma abordagem mais barata tanto em termos econômicos quanto em termos de número de pesquisadores envolvidos;
- Os modelos oferecem as informações necessárias no tempo certo;
- Os modelos são normalmente úteis para examinar fatos ou situações que seriam impossíveis de se fazer na realidade;
- Os modelos permitem obter conhecimento e entendimento sobre o objeto ou sistema que está sendo investigado.

As abordagens de modelagem propostas nesta Tese são baseadas em Processos Semi-Markovianos de Decisão e Cadeias de Markov de Tempo Contínuo e os conceitos relacionados as mesmas serão discutidos nas subseções seguintes.

2.4.2 Processos Markovianos e Semi-Markovianos de Decisão

Os processos de Markov¹ fornecem uma forma flexível e eficiente de descrição, caracterização e análise das propriedades de sistemas dinâmicos [94].

Esta ferramenta para a determinação da solução ótima de um dado sistema surgiu da fusão da teoria de Markov com a programação dinâmica. Tal ferramenta é denominada Processo Markoviano de Decisão (PMD), onde o mesmo possui um comportamento dinâmico, mas a transição de estados é feita através de tomadas de decisões [95] [96].

Os processos de Markov podem ser classificados de acordo com as naturezas do parâmetro tempo e do espaço de estados S . Quando o espaço de estados S de um processo Markoviano é discreto, tal processo é chamada de uma cadeia de Markov. Pode-se assim classificar os processos Markovianos de 4 formas [97]:

1. Cadeia de Markov de Tempo Discreto (CMTD), onde o espaço de estados S é discreto;
2. Cadeia de Markov de Tempo Contínuo (CMTTC), onde o espaço de estados S é discreto;

¹Para maiores detalhes, vide Apêndice A.1.

3. Processo de Markov de Tempo Discreto (PMTD), onde o espaço de estados S é contínuo;
4. Processo de Markov de Tempo Contínuo (PMTC), onde o espaço de estados S é contínuo;

Considere um sistema dinâmico observado em instantes de tempo $t = 1, 2, 3, \dots$. Em cada observação, o sistema é classificado em um conjunto de estados possíveis S . Para cada estado i , existe um conjunto de decisões possíveis $A(i)$, onde cada decisão acarreta em um custo (ou ganho) para o sistema. Tais considerações são o núcleo básico de um PMD e por meio delas, conjuntamente com algoritmos de cálculo de políticas de controle ótimas² segundo um critério de otimização dado, é possível se chegar a uma solução ótima para o modelo. Caso os instantes de tempo possuam um comportamento aleatório, então este processo é denominado de um Processo Semi-Markoviano de Decisão (PSMD) [95] [96].

Uma política específica a regra de decisões a ser usada em todos os instantes de decisão. Ela fornece ao gerenciador do sistema (para maiores detalhes, vide a Seção 3.2.3) uma prescrição para seleção de ações em qualquer estado possível futuro do sistema [95].

Uma política Π é uma sequência de regras de decisões, ou seja, $\Pi = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ para todo $t = 1, 2, \dots, N$. Uma política é dita estacionária se $d_1 = d_2 = \dots = d$. Em outras palavras, uma política estacionária é uma política que estabelece para cada estado i uma ação fixa a , e sempre usa esta ação toda vez que o sistema está no estado i [98]. Uma política ótima Π^* , por definição, é uma política que maximiza a função recompensa esperada total em relação a todas as políticas existentes [95].

Um PMD (e um PSMD) consiste de 5 elementos básicos: instantes de decisão, estados, conjunto de ações, custos e probabilidades de transição [95]. Tais elementos são detalhados a seguir:

- Instantes de Decisão: As decisões são realizadas em pontos do tempo denominados como instantes de decisão. Seja T o conjunto de instantes de decisão. Este subconjunto de números reais não-negativos pode ser classificado de duas maneiras: ou como um conjunto discreto ou como um conjunto contínuo. Quando discreto, as decisões são realizadas em todos os instantes de decisão. Quando contínuo, as decisões podem ser tomadas em: todos os instantes de decisão (continuamente); pontos aleatórios do tempo quando certos eventos ocorrem,

²Para maiores detalhes, vide Apêndice B.1.

tais como chegadas a um sistema de filas; pontos específicos, escolhidos por um gerenciador do sistema. O conjunto de instantes de decisão pode ser finito, no caso $T = 1, 2, \dots, N$ para algum inteiro $N < \infty$, ou infinito, no caso $T = 1, 2, \dots$. Quando N é finito, o problema de decisão irá ser chamado de problema de horizonte finito, e quando N é infinito, a denominação será de problema de horizonte infinito.

- **Estados e Conjunto de Ações:** Em cada instante de decisão, o sistema ocupa um estado i . Seja S a representação de um conjunto de estados e se, em um determinado instante de decisão, o gerenciador do sistema observa o sistema em um estado $i \in S$, é possível escolher uma ação ou um conjunto de ações permitidas $A(i)$ para o estado i .
- **Custos (ou Recompensas) e Probabilidades de Transição:** Como resultado da escolha de uma ação $a \in A(i)$ em um estado $i \in S$ em um instante de decisão $t \in T$, ocorre que: o sistema recebe um custo (ou recompensa) desta ação $C_t(i, a)$; o estado do sistema no próximo instante de decisão é determinado pela probabilidade de transição $p_t(\cdot \mid i, a)$. Quando positivo, $C_t(i, a)$ pode ser considerado como uma recompensa, quando negativo como um custo. Nas análises realizadas nas seções posteriores, considerou-se que cada ação possuía um custo correspondente. Quando o custo do sistema depende do estado do sistema no próximo instante de decisão, então $C_t(i, a, j)$ representa o valor, no tempo t , do custo recebido quando o estado do sistema a um instante de decisão t é i , a ação $a \in A$ é selecionada, e o sistema ocupa um estado j a um instante de decisão $t + 1$.

2.4.3 Cadeias de Markov de Tempo Contínuo - CMTC

Nas CMTC, as transições de estado podem ocorrer em instantes aleatórios no tempo, e não somente em instantes fixos ou discretos, como é o caso das CMTD. Assim, pode-se utilizar um sub-conjunto não negativo dos números Reais (\mathbb{R}_0^+) para referenciar o conjunto de valores da variável de tempo T de uma CMTC.

Um processo estocástico $\{X_t : t \in T\}$ constitui uma CMTC se, para um $t_i \in \mathbb{R}_0^+$ qualquer, com $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n < t_{n+1}$, $\forall n \in \mathbb{N}$ e $\forall s_i \in S = \mathbb{N}_0$, a equação abaixo for verdadeira [94]

$$P\{X_{t_{n+1}} = s_{n+1} \mid X_{t_n} = s_n, X_{t_{n-1}} = s_{n-1}, \dots, X_{t_0} = s_0\} =$$

$$= P\{X_{t_{n+1}} = s_{n+1} \mid X_{t_n} = s_n\}. \quad (2.4)$$

Se for imposta a condição de homogeneidade³ então, uma vez que a distribuição exponencial é a única distribuição contínua no tempo que apresenta a propriedade de não possuir memória [94], os tempos de transição entre estados de uma CMTC são exponencialmente distribuídos.

O lado direito da Equação 2.4 é conhecido como a probabilidade de transição $p_{ij}(u, v)$ de uma CMTC transitando do estado i ao estado j durante o período de tempo $[u, v)$ com $u, v \in T$ e $u \leq v$, ou matematicamente

$$p_{ij}(u, v) = P(X_v = j \mid X_u = i). \quad (2.5)$$

Para $u = v$, é possível definir

$$p_{ij}(u, u) = \begin{cases} 1 & i = j, \\ 0 & \text{outros valores} \end{cases} \quad (2.6)$$

Se as probabilidades de transição $p_{ij}(u, v)$ dependerem somente da diferença de tempo $t = v - u$ e não dos valores de u e v , as probabilidades de transição simplificadas para uma CMTC homogênea no tempo resultam em

$$p_{ij}(t) = p_{ij}(0, t) = P(X_{u+t} = j \mid X_u = i) = P(X_t = j \mid X_0 = i), \quad \forall u \in T. \quad (2.7)$$

Dadas as probabilidades de transição $p_{ij}(u, v)$ e as probabilidades $\pi_i(u)$ de uma CMTC no tempo u , as probabilidades de estado $\pi_j(v)$, $j \in S$ de um processo no tempo v podem ser obtidas [94]:

$$\pi_j(v) = \sum_{i \in S} p_{ij}(u, v) \pi_i(u), \quad \forall u, v \in T \quad (u \leq v). \quad (2.8)$$

Sendo $P(u, v) = [p_{ij}(u, v)]$ a matriz de transição de probabilidades para qualquer par de estados $i, j \in S$ e para qualquer intervalo de tempo $[u, v)$, $u, v \in T$, e o vetor $\pi(u) = (\pi_0(u), \pi_1(u), \pi_2(u), \dots)$ de probabilidades de estado em qualquer instante de tempo u , pode-se representar a Equação 2.8 em uma forma matriz-vetorial dada por

$$\pi(v) = \pi(u)P(u, v), \quad \forall u, v \in T \quad (u \leq v). \quad (2.9)$$

³Para maiores detalhes, vide Apêndice A.2.

Quando homogênea no tempo, a Equação 2.8 se reduz a

$$\pi_j(t) = \sum_{i \in S} p_{ij}(t) \pi_i(0) = \sum_{i \in S} p_{ij}(0, t) \pi_i(0), \quad (2.10)$$

ou em notação matriz-vetorial:

$$\pi(t) = \pi(0)P(t) = \pi(0)P(0, t). \quad (2.11)$$

A equação de **Chapman-Kolmogorov** pode ser obtida a partir da Equação 2.4 e aplicando-se o teorema da probabilidade total ⁴ [94]:

$$p_{ij}(u, v) = \sum_{k \in S} p_{ik}(u, w) p_{kj}(w, v), \quad 0 \leq u \leq w < v. \quad (2.12)$$

Entretanto, a resolução da Equação 2.12 não é encontrada de forma direta. Uma saída é transformar esta Equação em um sistema de equações diferenciais, a partir do qual pode-se encontrar os resultados desejados.

Com este propósito, pode-se definir as taxas de transição instantâneas $q_{ij}(t)$ ($i \neq j$) de uma CMTC movendo-se de um estado i para um estado j . Estas taxas de transição estão relacionadas às probabilidades de transição condicionais. Considere um período de tempo $[t, t + \Delta t)$, onde Δt é escolhido tal que $\sum_{j \in S} q_{ij}(t) \Delta t + o(\Delta t) = 1$ ⁵. É possível demonstrar que a função contínua, finita e não-negativa $q_{ij}(t)$ existe sob algumas condições gerais [94]. Para todos os estados $i, j, i \neq j$, pode-se definir:

$$q_{ij}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(t, t + \Delta t)}{\Delta t}, \quad i \neq j, \quad (2.13)$$

$$q_{ii}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ii}(t, t + \Delta t) - 1}{\Delta t}. \quad (2.14)$$

Existindo os limites anteriores, a partir das Equações 2.13 e 2.14 e uma vez que $\sum_{j \in S} p_{ij}(t, t + \Delta t) = 1$ a um instante qualquer de tempo t , pode-se escrever

$$\sum_{j \in S} q_{ij}(t) = 0, \quad \forall i \in S \quad (2.15)$$

⁴Para maiores detalhes, vide Apêndice A.3.

⁵A notação $o(\Delta t)$ é definida tal que $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} = 0$; isto é, pode-se substituir qualquer função por $o(\Delta t)$, a qual se aproxima mais rápido de 0 do que a função linear Δt .

O termo $q_{ij}(t)$, ($i \neq j$) representa a taxa na qual a CMTC deixa um estado i para transitar para um estado j em um tempo t .

De posse destas definições e retornando à Equação 2.12, pode-se substituir $v + \Delta t$ por v . Com uma interpretação equivalente, é possível considerar $q_{ij}(t)\Delta t + o(\Delta t)$ como a probabilidade de transição $p_{ij}(t, t + \Delta t)$ da cadeia de Markov transitar do estado i do estado j em $[t, t + \Delta t)$.

De posse destas definições, é possível retornar à equação de **Chapman-Kolmogorov** dada pela Equação 2.12. Substituindo v por $v + \Delta t$ na Equação 2.12 e subtraindo ambos os lados pela Equação 2.12 original, obtém-se

$$p_{ij}(u, v + \Delta t) - p_{ij}(u, v) = \sum_{k \in S} p_{ik}(u, w)[p_{kj}(w, v + \Delta t) - p_{kj}(w, v)]. \quad (2.16)$$

Dividindo-se ambos os lados da Equação 2.16 por Δt , tirando-se o limite $\lim_{\Delta t \rightarrow 0}$ do resultado da divisão e fazendo $w \rightarrow v$, é possível obter a equação diferencial conhecida como *equação de difusão de Kolmogorov - Kolmogorov forward equation* [94]:

$$\frac{\partial p_{ij}(u, v)}{\partial v} = \sum_{k \in S} p_{ik}(u, v)q_{kj}(v), \quad 0 \leq u < v. \quad (2.17)$$

Para o caso homogêneo, seja $t = v - u$ e das Equações 2.13 e 2.14 obtêm-se as taxas de transição independentes no tempo $q_{ij} = q_{ji}(t), \forall i, j \in S$, tal que a versão simplificada da Equação 2.17 para uma CMTC homogênea resulte em

$$\frac{dp_{ij}(t)}{dt} = \sum_{k \in S} p_{ik}(t)q_{kj} = \sum_{k \in S} p_{ik}(0, t)q_{kj}. \quad (2.18)$$

A partir das definições anteriores, é possível obter a equação diferencial para a probabilidade de estado incondicional $\pi_j(v), \forall j \in S$, a um tempo v :

$$\frac{d\pi_j(v)}{dv} = \sum_{k \in S} q_{kj}(v)\pi_k(v). \quad (2.19)$$

Para o caso homogêneo, uma versão simplificada da Equação 2.19 pode ser obtida assumindo $t = v - u$ e utilizando as taxas de transição independentes no tempo, q_{ij} :

$$\frac{d\pi_j(t)}{dt} = \sum_{i \in S} q_{ij}\pi_i(t), \quad \forall j \in S. \quad (2.20)$$

Pode-se agora, para o caso homogêneo, definir a matriz geradora infinitesimal Q da matriz de transição de probabilidades $P(t) = [p_{ij}(0, t)] = [p_{ij}(t)]$ através das Equações 2.13 e 2.14. A matriz Q

$$Q = [q_{ij}], \quad \forall i, j \in S, \quad (2.21)$$

contém as taxas de transição q_{ij} de um estado i para um estado j , onde $i \neq j$ para uma CMTC. Os elementos q_{ii} da diagonal principal de Q são definidos por $q_{ii} = -\sum_{j, j \neq i} q_{ij}$. Com a definição dada pela Equação 2.21, a Equação 2.20 pode ser escrita numa forma matriz-vetorial:

$$\dot{\pi}(t) = \frac{d\pi(t)}{dt} = \pi(t)Q. \quad (2.22)$$

Para análise de uma CMTC é importante determinar o vetor de probabilidades no estado de equilíbrio, π , o qual possui algumas propriedades. Para todos os estados $i \in S$, as probabilidades no estado de equilíbrio π_i são [94] [95]:

1. Independentes do tempo t ;
2. Independentes do vetor de probabilidade do estado inicial $\pi(0)$;
3. Estritamente positivas, $\pi_i > 0$;
4. Dado pelo limite quando $t \rightarrow \infty$, $\pi_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \pi_i(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} p_{ij}(t)$.

Se existindo para uma dada CMTC as probabilidades no estado de equilíbrio independentes no tempo, obtém-se imediatamente que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d\pi(t)}{dt} = 0. \quad (2.23)$$

Através da condição dada pela Equação 2.23, a equação diferencial para determinar as probabilidades de estado incondicionais, representada pela Equação 2.20, é resolvida através de um sistema de equações lineares, ou

$$0 = \sum_{i \in S} q_{ij} \pi_i, \quad \forall j \in S. \quad (2.24)$$

E na forma matriz-vetorial [94]

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{\pi} \mathbf{Q}. \quad (2.25)$$

Uma CMTC na qual um único vetor de probabilidade no estado de equilíbrio existe é chamada de CMTC ergódica.

Uma CMTC pode ser classificada de acordo com algumas de suas propriedades [94]:

- Uma CMTC é chamada de **irredutível** se todo estado i é alcançável a partir de todo estado j , onde $i, j \in \mathcal{S}$, isto é, $\forall i, j, i \neq j, \exists t : p_{ji}(t) > 0$;
- Uma CMTC homogênea, finita e irredutível é chamada de **ergódica** se, e somente se, um único vetor de probabilidade de estado no equilíbrio $\boldsymbol{\pi}$ existir.

Capítulo 3

Metodologia para Avaliação de Desempenho

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para avaliação de desempenho em redes de acesso considerando os dois componentes fundamentais desta metodologia: medidas e modelagem. A Seção 3.1 apresenta um conjunto de procedimentos de medidas, as quais foram realizadas para os dois tipos de redes de acesso consideradas: sistemas ADSL2+ e sistemas FBWNs. A Seção 3.2 apresenta as modelagens realizadas para estes dois tipos de redes de acesso utilizando-se dois tipos de processos Markovianos: CMTC e PSMD.

Os equipamentos e cabos utilizados nas medições fazem parte do Laboratório de Inovação Tecnológica (LabIT), integrante do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA) da UFPA ¹.

3.1 Medidas

3.1.1 Sistemas ADSL2+ – Cenário 1

O cenário de medições apresentado nesta Seção tem por objetivo caracterizar o tráfego genérico de um sistema ADSL2+ em função de parâmetros de rede tais como taxa de dados e *delay* (atraso na transmissão).

Esta caracterização objetiva obter parâmetros práticos que possibilitem a configuração de simuladores de rede, tais como o NS-2 e NS-3. A partir de tais configurações iniciais, é possível analisar, e até extrapolar, cenários típicos de utilização desta tecnologia.

Não foi considerada a inserção de ruídos no sistema, tais como ruído impulsivo ou *crossstalk*. Considerou-se apenas a existência de ruído de fundo do sistema (ruído

¹Para maiores detalhes, vide Apêndice C.

branco), próprio das características físicas do cabo metálico. Como esta abordagem é preliminar e é um passo básico e necessário para uma melhor compreensão do sistema, esta ausência de outros ruídos não invalida tal abordagem.

Para análise das características de transmissão de tráfego em um sistema ADSL2+, considerou-se o cenário mostrado na Figura 3.1.

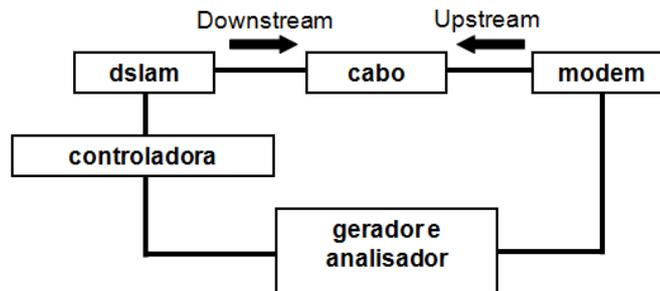


Figura 3.1: Cenário de testes para medições em ADSL2+ – Cenário 1.

Os equipamentos utilizados no cenário descrito na Figura 3.1 são detalhados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Equipamentos utilizados para as medições em ADSL2+ – Cenário 1.

Material/Equipamento	Especificações	Utiliza-	Função
cabo	1.500 m – seção 0,5 mm	das	Enlace do assinante
DSLAM	EDN312xp Ericsson		Atuação como CO
controladora	ECN320 Ericsson		Controladora do DSLAM
modem	ADSL2+ Home Gateway HM410dp Ericsson		Atuação como CPE
gerador e analisador	AX/4000 da Spirent Com- munications		Geração e análise de tráfego (<i>downstream</i> e <i>upstream</i>) no sistema

O tráfego gerado pelo AX/4000 foi um tráfego genérico composto apenas por pacotes IP de tamanho fixo arbitrário (1.000 *bytes*). Os resultados obtidos nesta abordagem são apresentados e discutidos na Seção 4.1.1.

3.1.2 Sistemas ADSL2+ – Cenário 2

Esta campanha de medições tem por objetivo analisar o impacto de ruído não estacionário na transmissão de tráfego multimídia em uma rede ADSL2+. Nas situações apresentadas, foram realizadas **10** repetições em cada teste.

O cenário de estudo é composto de computadores, modems, gerador de ruído, DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer – Multiplexador de acesso de

linha digital do assinante), cabos e analisador de protocolo. O cenário de medições é apresentado na Figura 3.2. A função e a descrição dos equipamentos utilizados é apresentada na Tabela 3.2.

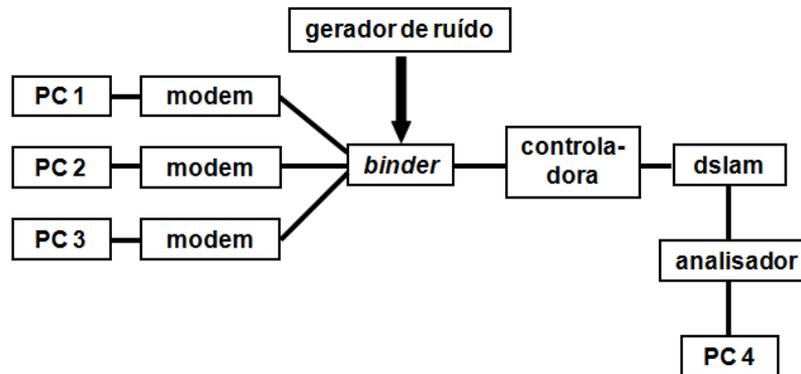


Figura 3.2: Cenário de testes para medições em ADSL2+ – Cenário 2.

Tabela 3.2: Equipamentos utilizados para as medições em ADSL2+ – Cenário 2.

Material/Equipamento	Especificações	Utilizadas	Função
<i>binder</i>	Cabo com 30 pares, 2.750 m, seção 0,5 mm		Enlace do assinante
DSLAM	EDN312xp Ericsson		Atuação como CO
controladora	ECN320 Ericsson		Controladora do DSLAM
modem	ADSL2+ Home Gateway HM410dp Ericsson		Atuação como CPE
PCs 1, 2, 3 e 4	Genéricos		Geração de tráfego
gerador de ruído	DLS 5500 da Spirent Communications		Geração de ruído
analisador	Análisador de protocolo Performer Lite da RAD-CON		Análise de tráfego

Neste cenário, o objetivo é analisar o impacto de ruído impulsivo em transmissões multimídia, ou seja, transmissões formadas por dados, vídeo e voz para usuários compartilhando o mesmo cabo metálico (*binder*). O ruído de *crosstalk* foi gerado naturalmente entre os modems, pois os mesmos compartilhavam o mesmo cabo.

O ruído impulsivo gerado pelo DLS 5500 teve como fonte a modelagem realizada a partir dos estudos da BT/DT (British Telecom / Deutsch Telekom) [99]. O ruído foi inserido na rede com uma potência inicial de $-24,2$ dBm e teve sua potência incrementada, sucessivamente, com valores de 2 dB, 4 dB, 6 dB e 8 dB. Este método possibilitou a análise do comportamento das aplicações de tráfego para cada aumento de nível de ruído no sistema.

Para a geração de tráfego de voz (VoIP), utilizou-se o programa Callgen [100], a fim de reproduzir chamadas VoIP de forma automática entre os computadores. O tempo total das chamadas realizadas foi de **30** minutos.

O tráfego de VoIP foi analisado através de dois parâmetros: *jitter* e pontuação média de opinião (MOS – Mean Opinion Score). O *jitter* é a variação de tempo entre as chegadas de pacotes no destino e o MOS é uma forma de classificar a qualidade da chamada VoIP através dos níveis mostrados na Tabela 3.3. Apesar do MOS ser uma medida subjetiva de qualidade, esta métrica pode ser estimada através de parâmetros objetivos coletados pelo programa Callgen.

Tabela 3.3: Classificação MOS.

MOS	Qualidade	Grau de Interferência
5	Excelente	Imperceptível
4	Boa	Perceptível, mas sem desconforto
3	Razoável	Aceitável
2	Pobre	Desconfortável
1	Ruim	Muito desconfortável

Para a geração de tráfego de dados nos computadores, utilizou-se o programa SI-EGE [101], o qual permite que se simule a conexão HTTP entre um estação servidora e várias estações clientes.

Entre cada estação cliente e a estação servidora foram configuradas **05** requisições simultâneas durante o tempo total de testes (**30** minutos). Isto equivale a cada estação cliente ter **05** sessões de um navegador abertas simultaneamente. As métricas coletadas para análise dos serviços HTTP foram atraso na transmissão, *jitter* e perda de pacotes.

Para a geração de tráfego de vídeo, utilizou-se o programa VLC [102] para se estabelecer um servidor de vídeo com codec MPEG-2 atendendo a três estações clientes e transmitindo a uma taxa de **1** Mbps.

O vídeo utilizado tinha um duração de **15** minutos e o mesmo foi executado duas vezes, a fim de se ter um tempo total de **30** minutos de testes. As métricas coletadas foram atraso na transmissão e perda de pacotes.

Os resultados obtidos nesta campanha de medições são apresentados e discutidos na Seção 4.1.2.

3.1.3 Sistemas ADSL2+ – Cenário 3

Utilizando-se como base o cenário de medições descrito na Figura 3.1 é possível analisar o impacto de outros tipos de ruído em um sistema ADSL2+. Neste estudo de caso, considerou-se a inserção de dois tipos de ruídos impulsivos padronizados pelo ITU-T: C1 e C2. Tais ruídos são descritos em [103] e os mesmos são voltados para testes de desempenho de sistemas DSL.

A mudança realizada no cenário de medições é a utilização de um simulador de linha ADSL2+ ETSI DLS 410E3 produzido pela Spirent Communications. A vantagem de utilização de um simulador de linha é a maior flexibilidade e facilidade no momento de configuração de cabos. O enlace simulado foi um cabo de **2.700** m e seção de **0,4** mm.

O AX/4000 gerou um tráfego IP genérico com um datagrama de tamanho igual a **980 bytes** e taxa de *upstream* de **798,19** kbps e de *downstream* de **4.100,26** kbps. As métricas coletadas pelo AX/4000 foram taxa de pacotes transmitidos e número de pacotes perdidos.

Os impulsos C1 e C2 foram injetados tanto do lado CO quanto do lado CPE, mas não simultaneamente. As amplitudes utilizadas para os dois tipos de pulso foram de **50** mV e **100** mV. Os ruídos foram injetados após **20** s do início dos testes, de tal forma que fosse possível observar uma situação sem ruído e outra com ruído. O intervalo de injeção de cada tipo de ruído foi de **1** s, totalizando **15** inserções de ruído na linha sob análise.

Antes da inserção de ruído impulsivo, as 02 unidades DSL foram treinadas com distúrbios definidos em [104], a saber: **20** distúrbios HDSL-Next com potência total de **-45,8** dBm em uma faixa de frequência de **0** a **1.544** MHz e ruído branco com uma densidade espectral de potência (PSD – Power Spectral Sensity) de **-140** dBm/Hz.

Os resultados obtidos nesta campanha de medições são apresentados e discutidos na Seção 4.1.3.

3.1.4 FBWNs – Cenário 4

Nesta seção são apresentadas medições de desempenho em FBWNs quando ocorre a transmissão de tráfego multimídia gerado por um equipamento profissional de uso de uma emissora de televisão local (TV Cultura do Pará) [105].

Nestes testes utilizou-se uma câmera de vídeo para a transmissão de som e vídeo. Estas medições foram realizadas em uma FBWN real implantada na cidade de Ma-

rituba/Pará. Esta rede está em operação com o uso de tecnologias PMP e PP, tal como mostrado de forma sintética na Figura 3.3.



Figura 3.3: Cenário de testes para medições em FBWNs – Cenário 4.

A FBWN sob análise opera em **5,7 GHz** tanto nos enlaces PP quanto PMP, com uma taxa efetiva de dados de **14 Mbps** e um alcance de aproximadamente **3,5 km**.

Para a análise de tráfego recebido, utilizou-se um programa de monitoramento baseado em protocolo de gerenciamento de rede (SNMP – Simple Network Management Protocol) chamado gerador de tráfego multi-roteado (MRTG – Multi Router Traffic Grapher) [106].

Os equipamentos utilizados durante as medições são especificados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Equipamentos utilizados para as medições em FBWN – Cenário 4.

Material/Equipamento	Especificações Utilizadas	Função
PMP	Rádio Canopy da Motorola	Enlace de rádio ponto-multiponto – 14 km
PP	Rádio BreezeNet da Alvarion	Enlace de rádio ponto a ponto – 1 km
switch	BlackDiamond 8800 da Extreme	Switch gerenciável
câmera	DSR-PD170 da Sony	Câmera de vídeo
Interface (no PC 1)	Studio 500 USB da Pinnacle	Interface USB para a câmera
FO	Fibra monomodo	Enlace de fibra óptica – 2 km
PC 1	genérico	Servidor de vídeo (Windows Media Encoder)
PC 2	genérico	Cliente de vídeo (Windows Media Player)

Para os testes foi realizada uma geração de tráfego multimídia ao vivo, ou seja, a câmera utilizada transmitia áudio e vídeo diretamente para um computador (computador 1) no qual estava instalado um servidor de vídeo.

Outro computador (computador 2) localizado na outra extremidade da rede acessava o vídeo gerado via um cliente de vídeo convencional (Windows Media Player).

As métricas analisadas foram latência, MOS e taxa de transmissão de dados. Os significados de MOS estão definidos na Tabela 3.3.

Dois tipos de tráfego multimídia foram gerados: vídeo de **1128** kbps com resolução de 320x240 e um vídeo de **2041** kbps com resolução de 640x480.

Os resultados obtidos nesta campanha de medições são apresentados e discutidos na Seção 4.1.4.

3.2 Modelagem

3.2.1 Sistema ADSL2+

A modelagem apresentada considera que os serviços de vídeo, voz e dados sofrem um processo de controle de admissão. Ou seja, o CAC proposto e analisado acontece apenas para os serviços existentes na rede DSL e não para os usuários desta. Como o enlace DSL é dedicado ao usuário, este não precisa competir pelo acesso ao meio físico.

Esta consideração não inviabiliza os estudos apresentados a seguir, visto o que o interesse acadêmico por CAC em redes de acesso é um assunto relevante (vide motivação na Seção 1.2).

O sistema sob análise consiste de um enlace de capacidade finita de B Mbps. Tal enlace transporta **03** tipos diferentes de tráfego: vídeo, voz e dados. Cada tipo de dados possui uma determinada necessidade de taxa de dados e latência.

As chamadas de vídeo e voz possuem as características de necessitarem taxas de dados constantes e serem sensíveis a latências excessivas.

Por sua vez, as chamadas de dados possuem uma característica menos rigorosa e podem suportar variações nas taxas de dados devido ao mecanismo de controle de fluxo do protocolo TCP. Na modelagem apresentada, entenda-se por chegada de uma chamada de um tipo qualquer de tráfego como a solicitação do serviço para transmissão deste tráfego. Da mesma forma, entenda-se por saída de uma chamada de tráfego como o encerramento da transmissão do mesmo.

Adicionalmente, os serviços de dados compartilham entre si igualmente a largura de banda não utilizada pelas chamadas de voz e vídeo, o que significa que as taxas de serviço das chamadas de dados podem variar ao longo do tempo, dependendo do número de chamadas saíntes de vídeo, voz e dados.

Cada tipo de tráfego possui uma taxa de dados mínima pré-fixada. Se em um dado momento uma chamada de um tipo de tráfego requerer uma taxa de dados não disponível no sistema, esta nova requisição de recursos será negada.

Para a modelagem Markoviana considerou-se que os **03** tipos de tráfego (vídeo, voz

e dados) possuem taxas de chegada que obedecem a uma distribuição de Poisson e são mutuamente independentes com taxas denominadas λ_{vi} , λ_{vo} e λ_d , respectivamente. Tal consideração é justificada para usuários tradicionais de voz e é válida para outros tipos de tráfego da Internet [107] [108].

Os tempos de serviço das chamadas de vídeo, voz e dados são variáveis aleatórias exponencialmente distribuídas com parâmetros $1/\mu_{vi}$, $1/\mu_{vo}$ e $1/\mu_d$, respectivamente.

Se uma chamada entrante de vídeo é aceita pelo agente controlador do sistema, tal chamada recebe uma taxa de dados fixa B_{vi} . Então com vi chamadas de vídeo no sistema, há uma capacidade utilizada para vídeo de viB_{vi} .

Da mesma forma, se uma chamada de voz é aceita, uma taxa de dados B_{vo} será reservada para este serviço e uma taxa de dados total voB_{vo} será utilizada por vo chamadas de voz.

As chamadas de dados compartilham a banda restante que não é utilizada por vídeo e voz. Assim,

$$\psi = viB_{vi} + voB_{vo}, \quad (3.1)$$

é a largura de banda total utilizada pelas chamadas de tempo real.

Desta forma, as chamadas de dados d utilizarão uma parcela de largura de banda definida por $\frac{B-\psi}{d}$. Com vi , vo e d chamadas de tráfego no sistema, as taxas de completamento do serviço serão $vi\mu_{vi}$, $vo\mu_{vo}$ e $(B - \psi)\mu_d$, respectivamente.

Quando a capacidade restante do enlace está totalmente ocupada por chamadas de dados e uma chamada entrante de voz ou vídeo for aceita, tal chamada irá substituir uma ou mais chamadas de dados existentes, de tal forma que a nova chamada seja acomodada no sistema.

Uma vez que há uma taxa mínima estabelecida para as chamadas de dados, é necessário determinar se a largura de banda restante irá suportar todas as chamadas de dados existentes. Após a admissão de uma nova chamada de voz ou vídeo, o sistema pode suportar

$$\theta = \lfloor \frac{B - \psi}{B_d} \rfloor, \quad (3.2)$$

chamadas de dados com uma largura B_d para cada chamada onde $\lfloor x \rfloor$ é o maior inteiro não superior a x .

Assim, se $d < \theta$, o sistema então poderá suportar todas as chamadas de dados existentes com uma taxa de dados maior que B_d .

Em caso contrário, algumas chamadas de dados serão perdidas e o sistema irá reduzir a taxa de dados das chamadas de dados remanescentes (θ) até a largura de banda B_d . Matematicamente, o número de chamadas de dados no sistema será o valor mínimo entre d e θ , ou seja, $\min(d, \theta)$.

A alocação de recursos ótima é proposta como um PSMD. A escolha do PSMD se deve ao fato de que o período de tempo entre dois instantes consecutivos de decisão no sistema em análise não é determinístico, ou seja, o tempo entre os instantes de decisão pode seguir uma distribuição de probabilidade arbitrária.

Os estados deste PSMD são definidos por

$$\Psi = \{(vi, vo, d, e) / 0 \leq vi \leq \lfloor \frac{B}{B_{vi}} \rfloor, 0 \leq vo \leq \lfloor \frac{B}{B_{vo}} \rfloor, 0 \leq d \leq \lfloor \frac{B}{B_d} \rfloor, e \in \{0, 1, 2\}\} \quad (3.3)$$

Onde vi , vo e d são os números de chamadas já definidos anteriormente.

Os números máximos de chamadas de vídeo, voz e dados são calculados por $\lfloor \frac{B}{B_{vi}} \rfloor$, $\lfloor \frac{B}{B_{vo}} \rfloor$ e $\lfloor \frac{B}{B_d} \rfloor$, respectivamente.

O termo e é o último evento ocorrido e tal informação é introduzida no espaço de estados a fim de definir o conjunto de possíveis ações em cada estado. De acordo com dinâmica do sistema, os valores de e podem ser:

- $e = 0$, para chegada de uma chamada de dados ou saída de uma chamada de vídeo, voz e dados;
- $e = 1$, para chegada de uma chamada de vídeo;
- $e = 2$, para chegada de uma chamada de voz.

Considera-se que cada estado representa a configuração do sistema logo após a ocorrência de um evento e antes de uma tomada de decisão. Os instantes de decisão são as chegadas de uma chamada de vídeo e de voz, ou seja, $e = 1, 2$. Para $e = 0$ nenhuma decisão é tomada, o que significa que todas as chamadas de dados são aceitas inicialmente no sistema.

Considere que

$$\sigma = B_j + \sum (viB_{vi} + voB_{vo}) \quad (3.4)$$

é a taxa de dados utilizada por chamadas de tempo real mais a taxa de dados por uma solicitação de uma nova conexão j , a qual é determinada pelo valor de e , isto é, se $e = 1$ então $B_j = B_{vi}$, e se $e = 2$, então $B_j = B_{vo}$.

Quando $\sigma \leq B$ e a variável aleatória e é igual a **1** ou **2**, então uma decisão de aceitação ou rejeição deve ser realizada.

Cada variável de decisão pode assumir os valores **0** ou **1**, onde **1** significa uma aceitação e **0** significa uma rejeição. Por outro lado, quando $\sigma > B$ somente uma decisão de rejeição pode ser feita.

Desta forma, o espaço de ações possíveis pode ser expresso para todo $i \in S$ através de

$$A(i) = \begin{cases} a = 1, & \text{se } e = 1, 2 \text{ e } \sigma \leq B; \\ a = 0, & \text{se } e = 0 \text{ ou } \sigma > B \text{ e } e = 1, 2. \end{cases} \quad (3.5)$$

Os períodos de completamento de serviços (encerramento das chamadas de vídeo e voz) e de chegada de chamadas de dados são definidos como períodos de decisão fictícios em adição aos períodos reais de decisão ($e = 1, 2$). Por padrão, a ação $a = 0$ é utilizada nestes períodos fictícios de decisão.

Para esta modelagem, dado que um período de decisão do sistema está em um estado $i \in S$ e uma ação $a \in A(i)$ é escolhida, pode-se definir:

- $\tau_i(a)$ como o tempo esperado até o próximo período de decisão, se uma ação a é escolhida no estado atual i ;
- $p_{ij}(a)$ como a probabilidade de que no próximo período de decisão o estado seja j , se uma ação a é escolhida no estado atual i ;
- $C_i(a)$ como o custo esperado até o próximo período de decisão, se uma ação a é escolhida no estado atual i .

Estas quantidades podem ser calculadas como:

$$\tau_i(a) = \frac{1}{\lambda_{vi} + \lambda_{vo} + \lambda_d + v_i\mu_{vi} + v_o\mu_{vo} + (B - \psi)\mu_d}. \quad (3.6)$$

$$p_{ij}(a) = \left\{ \begin{array}{l}
 \lambda_{vi}\tau_i(a), \\
 se \forall i = (vi, vo, d, 1), j = (vi + 1, vo, \min(d, \theta), e) \in S, \\
 e a = 1 \in A(i); \\
 \lambda_{vi}\tau_i(a), \\
 se \forall i = (vi, vo, d, 1), j = i \in \Phi \text{ e } a = 0 \in A(i); \\
 \lambda_{vo}\tau_i(a), \\
 se \forall i = (vi, vo, d, 2), j = (vi, vo + 1, \min(d, \theta), e) \in S, \\
 e a = 1 \in A(i); \\
 \lambda_{vo}\tau_i(a), \\
 se \forall i = (vi, vo, d, 2), j = i \in \Phi \text{ e } a = 0 \in A(i); \\
 \lambda_d\tau_i(a), \\
 se \forall i = (vi, vo, d, 0), j = (vi, vo, d + 1, e) \in S, \\
 a = 0 \in A(i), ed < \lfloor \frac{B - \psi}{B_d} \rfloor; \\
 vi\mu_{vi}\tau_i(a), \\
 se \forall i = (vi, vo, d, 0), j = (vi - 1, vo, d, e) \in S, \\
 e a = 0 \in A(i); \\
 vo\mu_{vo}\tau_i(a), \\
 se \forall i = (vi, vo, d, 0), j = (vi, vo - 1, d, e) \in S, \\
 e a = 0 \in A(i); \\
 (B - \psi)\mu_d\tau_i(a), \\
 se \forall i = (vi, vo, d, 0), j = (vi, vo, d - 1, e) \in S, \\
 e a = 0 \in A(i);
 \end{array} \right. \quad (3.7)$$

O objetivo desta modelagem é minimizar a função custo, a qual é formada pelos bloqueios existentes nas chamadas de tempo real, ou seja:

$$C_i(a) = C_{vi}(i, a) + C_{vo}(i, a) \quad (3.8)$$

onde $C_{vi}(i, a)$ e $C_{vo}(i, a)$ são o custo do bloqueio das chamadas de vídeo em um estado $i \in S$ e uma ação $a \in A(i)$, e o custo do bloqueio das chamadas de voz também em um estado $i \in S$ e uma ação $a \in A(i)$, respectivamente.

Tais custos são calculados por

$$C_{vi}(i, a) = c_{vi}, \forall e = 1 \text{ e } a = 0 \in A(i), \quad (3.9)$$

e

$$C_{vo}(i, a) = c_{vo}, \forall e = 2 \text{ e } a = 0 \in A(i), \quad (3.10)$$

sendo c_{vi} e c_{vo} , respectivamente, os custos imediatos que ocorrem quando uma chamada de vídeo ou chamada de voz ($e = 1, 2$) é bloqueada.

Com $\tau_i(a)$, $p_{ij}(a)$ e $C_i(a)$ e utilizando o algoritmo de iteração de valores, é possível obter a política ótima estacionária para o sistema.

A política estacionária \mathbf{R} , definida pela regra de decisão $\mathbf{f} : \Phi \rightarrow \mathbf{A}$, descreve a ação $\mathbf{f}(i) \in \mathbf{A}(i)$ cada vez que o sistema é observado em um estado $i \in \mathbf{S}$.

Métricas de Desempenho

A fim de avaliar a modelagem realizada, faz-se necessário o estabelecimento de métricas de desempenho com o intuito de se quantificar o comportamento do sistema em estudo.

Considere um estado $i \in \mathbf{S}$ e uma ação $\mathbf{a} = \mathbf{1} \in \mathbf{A}(i)$. O tráfego médio (\mathbf{T}_m) das chamadas de tempo real (vídeo ou voz) transportadas no sistema pode ser definido como:

$$\mathbf{T}_m = \sum_{\forall i \in \Phi, e=1 \text{ ou } 2, \mathbf{a}=\mathbf{1} \in \mathbf{A}(i)} \tau_i(\mathbf{a})^{-1} \pi_i. \quad (3.11)$$

Onde π_i é a distribuição de probabilidade de equilíbrio do PSMD calculado após a política ótima ser encontrada.

Através de \mathbf{T}_m , é possível calcular a probabilidade de bloqueio das chamadas de tempo real através de:

$$P_{ve} = 1 - \frac{O_e}{\lambda_{ve}}. \quad (3.12)$$

Onde ve depende do valor de e . Assim, se $e = \mathbf{1}$, então $ve = vi$ e se $e = \mathbf{2}$, então $ve = vo$.

A probabilidade de bloqueio de uma chamada de dados é dada pela probabilidade de uma chamada de dados entrante encontrar um valor menor que a taxa de dados mínima exigida para tal tipo de tráfego, ou seja

$$P_{dc} = \sum_{d \geq \lfloor \frac{B-\psi}{B_d} \rfloor} \pi_i. \quad (3.13)$$

A utilização de recursos do enlace (\mathbf{U}) é dada pela relação entre a somatória das taxas de dados utilizadas por todos os tipos de tráfego existentes pela taxa de dados total do sistema, ou matematicamente por:

$$\mathbf{U} = \frac{B_{vi} \sum_{vi>0} vi \pi_i + B_{vo} \sum_{vo>0} vo \pi_i + \sum_{d>0} (B - \psi) \pi_i}{B}. \quad (3.14)$$

Características do Sistema ADSL2+ Analisado

O sistema modelado consiste de um enlace ADSL2+ com uma taxa de dados de **16** Mbps. A Tabela 3.5 apresenta os valores utilizados nesta análise para os demais parâmetros do sistema, os quais são baseados em valores encontrados na literatura [109] [110]:

Tabela 3.5: Parâmetros utilizados na modelagem Markoviana.

Parâmetro	Valor
Taxa de dados de downstream (B)	16 Mbps
Taxa de dados de uma chamada de vídeo (B_{vi})	5 Mbps (MPEG-2)
Taxa de dados de uma chamada de voz (B_{vo})	64 kbps
Taxa mínima de dados de uma chamada de dados (B_d)	56 kbps
Duração média de uma chamada de vídeo	5400 s
Duração média de uma chamada de áudio	120 s
Duração média de uma chamada de dados	3600 s
Custo do bloqueio de uma chamada de vídeo	10
Custo do bloqueio de uma chamada de áudio	2

Os custos de bloqueio de vídeo e áudio apresentados na Tabela 3.5 são arbitrários. Uma adequada definição destes custos de bloqueio possibilitará uma melhor aplicabilidade desta modelagem.

Para efeitos de análise, consideraram-se duas variações distintas: λ_{vi} e λ_{vo} .

Na primeira situação, o parâmetro λ_{vi} possuiu uma variação de **1** a **9** chamadas por hora (0,00027, 0,00055, 0,00083, 0,00111, 0,00138, 0,00166, 0,00194, 0,00222 e 0,0025 chamadas por segundo), enquanto que as taxas de chegada das chamadas de voz e dados possuíram os valores **0,0027** chamadas por segundo e **0,08** chamadas por segundo, respectivamente.

Na segunda situação, o parâmetro λ_{vo} possuiu uma variação de **10** a **100** chamadas por hora (0,0027, 0,0055, 0,0083, 0,0111, 0,0138, 0,0166, 0,0194, 0,0222, 0,0250 e 0,0277 chamadas por segundo), enquanto que as taxas de chegada das chamadas de vídeo e dados possuíram valores de **0,00027** chamadas por segundo e **0,0083** chamadas por segundo, respectivamente.

3.2.2 FBWNs

Para a realização da modelagem proposta, é considerado um cenário onde uma FBWN realiza a compartilhamento completo de seus B canais (a largura de banda ou a taxa de dados total disponível do sistema).

Esta FBWN possibilita o uso de três tipos de serviços: serviços de vídeo de alta qualidade (HQV – High-Quality Video), serviços de vídeo de baixa qualidade (LQV – Low-Quality Video) e serviços de conexões Internet (IC – Internet Connections). Ambos os serviços de vídeo necessitam de uma largura de banda específica para atender suas necessidades de QoS.

Os serviços HQV são voltados para dar suporte para serviços conhecidos como *killer applications*, ou seja, serviços que necessitam de altas taxas de dados com requisitos específicos de QoS, tais como aplicações médicas em telemedicina.

Os serviços LQV são voltados para serviços de vídeo menos exigentes, onde os requisitos de QoS podem sofrer alterações durante a operação dos sistema sem causar tanto impacto a tais serviços. Exemplos destes serviços incluem vídeo-conferência, tele-educação e similares.

Os serviços IC são os tradicionalmente conhecidos da Internet, tais como WWW e *e-mail*, etc.

Nesta modelagem é considerado que há adaptação de largura de banda apenas para os serviços IC, e para isto, utiliza-se o mecanismo de degradação e compensação. A ideia por trás do mecanismo de degradação e compensação é o conceito de partida ideal [111] [112], no qual a taxa de partida instantânea real é proporcional a largura de banda atual de cada conexão.

Para modelar estocasticamente este sistema, é definido um conjunto Ψ de todos os estados possíveis como

$$\Psi = \{(i, j, l) / 0 \leq i \leq \lfloor \frac{B}{B_{HQV}} \rfloor, 0 \leq j \leq \lfloor \frac{B}{B_{LQV}} \rfloor, 0 \leq l \leq \lfloor \frac{B}{B_{min}} \rfloor\}, (3.15)$$

onde i , j , e l são o número de serviços saíntes HQV, LQV e IC, respectivamente.

Os serviços saíntes HQV e LQV necessitam de B_{HQV} e B_{LQV} canais de rádio, respectivamente, para atender seus requisitos de QoS.

Para os serviços IC, a quantidade de largura de banda pode variar entre um valor mínimo (B_{min}) e um valor máximo (B_{max}).

A fim de que se tenha um modelo estocástico tratável de acordo com a teoria Markoviana, considera-se que o padrão de chegada dos serviços de vídeo e IC sejam processos de Poisson mutuamente independentes com parâmetros λ_v e λ_l , respectivamente. Tal consideração é válida para os tráfegos considerados [107] [108].

Considera-se $p\%$ o percentual de vídeos HQV sobre o total de tráfego do sistema. Assim a taxa de chegada de serviços HQV no sistema é dada por $\lambda_{vHQV} = p\lambda_v$.

O restante do tráfego de vídeo corresponde aos serviços LQV com taxa dada por $\lambda_{vLQV} = (1 - p)\lambda_v$. Adicionalmente, todos os serviços entregues necessitam de tempos de serviço exponencialmente negativos com taxas médias dadas por $1/\mu_{HQV}$, $1/\mu_{LQV}$, e $1/\mu_l$ para serviços HQV, LQV e IC, respectivamente.

Na modelagem da elasticidade do tráfego Internet, assume-se que, sempre que possível, uma requisição IC é aceita e servida com a largura de banda máxima (B_{max}); entretanto, devido à ocupação dinâmica dos recursos disponíveis, a largura de banda pode variar entre os larguras mínimas (B_{min}) e máximas (B_{max}) após a ocorrência de qualquer mudança de estado do sistema quando ocorre a chegada ou partida (término) de novas chamadas.

Desta forma, sendo i e j os serviços saíntes, cada serviço IC irá receber uma largura de banda de

$$b_w(l) = \min(B_{max}, \max(1, \frac{B - iB_{HQV} - jB_{LQV}}{l})), \quad (3.16)$$

e irá ser servido com uma taxa de serviço de

$$\mu_l' = \frac{b_w(l)}{B_{max}}\mu_l. \quad (3.17)$$

No CAC proposto as conexões de vídeo são aceitas sempre que houver largura de banda suficiente para acomodá-las e tais conexões têm prioridade preemptiva sobre os serviços IC, ou seja, os serviços de vídeo podem retirar largura de banda dos serviços ICs ou até mesmo removê-los.

Uma vez que há uma largura de banda mínima especificada para um serviço IC, será necessário determinar se o restante de largura de banda, após a admissão de uma chamada de vídeo, será suficiente para acomodar todos os serviços IC existentes.

Desta forma, considere que

$$\theta = \lfloor \frac{B - iB_{HQV} - jB_{LQV}}{B_{min}} \rfloor, \quad (3.18)$$

é o número de serviços IC sendo servidos com uma largura de banda mínima B_{min} após a admissão de um serviço de vídeo.

Assim, se $l < \theta$, então o CAC pode suportar todos os serviços IC existentes com largura de banda maior do que B_{min} ; caso contrário, $\zeta = l - \theta$ serviços IC serão descartados e o CAC irá reduzir a largura de banda dos θ restantes para B_{min} . Em resumo, o número de serviços IC admitidos pelo CAC, sempre que uma conexão de vídeo for aceita, será dado por $\min(l, \theta)$.

Dado Ψ e as premissas consideradas anteriormente, é possível desenvolver, como mostrado na Tabela 3.6, a CMTC usada na caracterização do CAC proposto nesta Tese. Considere que $\mathbf{X}(t)$ é a carga da rede dada por $i\mathbf{B}_{HQV} + j\mathbf{B}_{LQV}$.

Tabela 3.6: Transições do estado $\Psi = (i, j, l)$ para todos os possíveis estados sucessores.

Próximo Estado	Condição	Taxa	Evento
$(i+1, j, \min(l, \theta))$	$\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}_{HQV} < \mathbf{B}$	λ_{HQV}	Chegada de HQVs
$(i, j+1, \min(l, \theta))$	$\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}_{LQV} < \mathbf{B}$	λ_{LQV}	Chegada de LQVs
$(i, j, l+1)$	$l < \lfloor \frac{B - i\mathbf{B}_{HQV} - j\mathbf{B}_{LQV}}{B_{min}} \rfloor$	λ_l	Chegada de ICs
$(i-1, j, l)$	$i > 0$	$i\mu_{HQV}$	Partida de HQVs
$(i, j-1, l)$	$j > 0$	$i\mu_{LQV}$	Partida de LQVs
$(i, j, l-1)$	$l > 0$	$l\mu_l$	Partida de ICs

A partir da Tabela 3.6, pode-se concluir que a CMTC possui um espaço de estados finito e irredutível.

Assim, suas probabilidades no estado de equilíbrio, π_i , podem ser calculadas através da Equação 2.25 junto com a condição de normalização $\sum_{\forall i} \pi_i = \mathbf{1}$ [94]; onde \mathbf{Q} é a matriz geradora infinitesimal construída pelas regras definidas na Tabela 3.6.

Métricas de Desempenho

Dado $\pi(\cdot)$, é possível analisar o desempenho do CAC proposto por meio das probabilidades existentes para cada tipo de serviço. Por exemplo, para serviços HQV, a probabilidade de bloqueio pode ser calculada como

$$P_{HQV} = \sum_{\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}_{HQV} \geq \mathbf{B}} \pi(i, j, l). \quad (3.19)$$

Observe que o sistema irá bloquear este serviço sempre que não houver largura de banda suficiente para acomodar uma nova solicitação.

Da mesma forma, a probabilidade de bloqueio para os serviços LQV pode ser calculada por:

$$P_{LQV} = \sum_{\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}_{LQV} \geq \mathbf{B}} \pi(i, j, l). \quad (3.20)$$

A probabilidade de bloqueio dos serviços IC é calculada por:

$$P_l = \sum_{l \geq \lfloor \frac{B - iB_{HQV} - jB_{LQV}}{B_{min}} \rfloor} \pi(i, j, l). \quad (3.21)$$

A utilização dos recursos do sistema U , definida pela razão entre o número médio de canais de rádio ocupados e o número total de canais de rádio, é calculada por:

$$U = \frac{1}{B} \sum (iB_{HQV} + jB_{LQV} + lb_w(l))\pi(i, j, l). \quad (3.22)$$

Características do Sistema FBWN Analisado

Para avaliar o desempenho do CAC, os resultados do mesmo foram comparados a um CAC para redes sem fio utilizando também CMTC e apresentado em [46] para dois tipos de serviço: melhor esforço (BE) e geração de serviços em tempo real (rtPS).

Os parâmetros utilizados nas simulações estão resumidos na Tabela 3.7, a menos quando especificado o contrário. De forma a tornar mais correta a comparação entre os resultados de cada CAC, os mesmos parâmetros usados por [46] foram também considerados.

Tabela 3.7: Parâmetros utilizados nas análises numéricas da modelagem proposta.

Parâmetro	Símbolo	Valor Base
Largura de Banda Total	B	15 Mbps
Largura de Banda - HQV	B_{HQV}	3 Mbps
Largura de Banda - LQV	B_{LQV}	1 Mbps
Largura de Banda - IC	$[B_{max}, B_{min}]$	[1, 1] Mbps
Tempo de serviço - HQV	$1/\mu_{HQV}$	15 minutos
Tempo de serviço - LQV	$1/\mu_{LQV}$	10 minutos
Tempo de serviço - IC	$1/\mu_l$	25 minutos
Percentual de conexões HQV	p	20%

3.2.3 Aspectos Técnicos de Implantação da Modelagem Proposta em Redes de Acesso

Nesta Seção, é discutido como é possível implementar as modelagens propostas nas redes de acesso analisadas: ADSL2+ e FBWN.

Para determinar a política ótima, é necessário primeiramente conhecer o perfil de QoS dos usuários do sistema para os tipos de tráfego que irão ser transmitidos. Esta informação pode ser obtida do SLA definido entre a operadora da rede de acesso e os usuários do sistema no momento da contratação do serviço.

Após obter tais informações, presume-se então que as propriedades operacionais e os objetivos mínimos de atendimento da rede são conhecidos e acordados por todas as partes interessadas (operadora e usuários).

O cálculo da política ótima é realizado *offline*, ou seja, em um momento anterior a operação normal do sistema, por exemplo, em uma janela programada de manutenção. Eventuais atualizações de parâmetros e consequentes novos cálculos para determinação de políticas ótimas podem ser realizados em tais horários de manutenção.

Nas simulações realizadas, o tempo gasto para cálculo das políticas ótimas para aproximadamente 900 estados levou cerca de **2** min em um computador Intel Core **2** Duo, clock de **1,86** GHz e com **2** GB de memória RAM.

A necessidade do cálculo *offline* das políticas ótimas decorre do fato que, em geral, os equipamentos das operadoras para as redes ADSL2+ e FBWN são tecnologias proprietárias e/ou baseadas em padrões específicos, e por isso não possuem flexibilidade nem capacidade computacional mínima para o cálculo de políticas ótimas utilizando cadeias de Markov.

Adicionalmente, a utilização apenas dos resultados calculados para as políticas ótimas possibilita uma implementação mais rápida e sem grandes interrupções no serviço da rede das modelagens propostas.

Após a determinação da política ótima, os resultados obtidos podem ser armazenados em formato de tabela em arquivos do tipo *csv* (comma separated value – valores separados por vírgula). Cada entrada da tabela especifica a ação ótima para um dado estado do sistema.

Durante o processo normal de operação da rede, o agente controlador da sistema verifica a tabela com os resultados e encontra a ação ótima correspondente ao estado atual do sistema, executando a respectiva decisão ótima.

O algoritmo de busca que necessita ser implementado pelo agente controlador possui baixa complexidade computacional, sendo possível o uso de algoritmos tais como o algoritmo de pesquisa binária ou o de pesquisa sequencial [113], não impactando assim significativamente no desempenho global de gerência do sistema.

Este agente controlador pode estar instalado localmente, na BS ou central telefônica, ou em uma central remota de gerência da rede (CGR – Central de Gerência de Redes), estando este CGR localizado em algum ponto remoto em relação a rede de acesso gerenciada. O uso de uma gerência centralizada ou descentralizada será uma decisão da operadora do sistema.

Devido o resultado da modelagem ser basicamente um arquivo do tipo texto contendo os estados possíveis e as respectivas ações, a implementação deste CAC pode ser realizada nas plataformas computacionais mais comuns (windows, linux ou similares), flexibilizando assim a sua abrangência de implantação.

Este tipo de abordagem facilita que tais solução sejam embarcadas em dispositivos ou programas computacionais específicos para gerência de redes.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com as medições realizadas e com as modelagens propostas nesta Tese.

4.1 Medidas

4.1.1 Sistemas ADSL2+ – Cenário 1

Os resultados aqui apresentados foram obtidos com o cenário de medições descrito na Seção 3.1.1, o qual trata da transmissão de um tráfego genérico em uma rede ADSL2+.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos para este cenário. Foram coletados valores de taxa de dados e *delay* tanto para o tráfego *downstream* quanto para o tráfego *upstream*.

Tabela 4.1: Resultados medidos para ADSL2+ – Cenário 1.

Downstream		Upstream	
Taxa(Mbps)	delay(ms)	Taxa(kbps)	delay(ms)
9,799	8,334	939,360	283,882
9,799	8,334	950,360	283,877
9,799	8,334	950,365	283,894
9,799	8,334	936,180	283,883
9,799	8,334	944,920	283,886
9,799	8,334	941,645	283,863
9,799	8,333	940,703	283,863
9,799	8,332	833,888	283,881
9,799	8,334	936,202	283,826
9,799	8,334	840,197	283,844

Os valores médio, desvio padrão, e intervalo de confiança para o experimento realizado são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores médio, desvio padrão e intervalo de confiança – Cenário 1.

Valores Médio			
Downstream		Upstream	
Taxa(Mbps)	delay(ms)	Taxa(kbps)	delay(ms)
9,799	8,3337	921,3834	283,8686
Desvio Padrão			
Downstream		Upstream	
Taxa(Mbps)	delay(ms)	Taxa(kbps)	delay(ms)
0	0,000675	44,75214	0,021972
Intervalo de Confiança ($1 - \alpha = 0,05 = 95,5\%$)			
Downstream		Upstream	
Taxa(Mbps)	delay(ms)	Taxa(kbps)	delay(ms)
0	0,000418	27,73716	0,013618

Os resultados obtidos são úteis para estabelecer valores básicos característicos de cenários ADSL2+, os quais podem ser usados como parâmetros de configuração para simuladores de rede, tais como o NS-2 ou NS-3, aumentando assim a confiabilidade e abrangência das análises realizadas por tais simuladores.

4.1.2 Sistemas ADSL2+ - Cenário 2

Os resultados aqui apresentados foram obtidos com o cenário de medições descrito na Seção 3.1.2, o qual trata de analisar o impacto de ruído não estacionário na transmissão de tráfego multimídia em uma rede ADSL2+.

As Tabelas 4.3, 4.4, e 4.5 apresentam os resultados para este estudo de caso utilizando o analisador de protocolo para obtenção das métricas analisadas.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados para o tráfego de VoIP do cenário descrito na Seção 3.1.2 quando era considerado apenas o ruído branco (ARB – Apenas Ruído Branco) e com os diferentes acréscimos de potência do ruído impulsivo. Os índices de MOS observados estão em valores aceitáveis, pois permitem a realização das chamadas VoIP mesmo com a presença perceptível de interferências na transmissão. O *jitter* médio não sofreu grandes variações (um máximo de 4,36% em relação ao maior valor medido), não impactando assim decisivamente na qualidade da transmissão.

Tabela 4.3: Resultados medidos para o VoIP – Cenário 2.

	ARB	2 dB	4 dB	6 dB	8 dB
MOS médio	3,65	3,72	3,69	3,73	3,76
Jitter médio (s)	9,75	9,75	9,57	9,85	9,42

A Tabela 4.4 apresenta os resultados para o tráfego HTTP em duas situações:

com ARB e com diferentes e sucessivos acréscimos de potência do ruído impulsivo.

A inserção de ruído foi menos perceptível ainda para o tráfego HTTP, pois as métricas coletadas tiveram pouca alteração em seus valores.

Tabela 4.4: Resultados medidos para o HTTP – Cenário 2.

	ARB	2 dB	4 dB	6 dB	8 dB
Atraso médio (s)	0,1021	0,1194	0,1192	0,1203	0,1202
Jitter médio (s)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Perda de pacotes (%)	0,34454	0,341272	0,337632	0,339985	0,343947

A Tabela 4.5 apresenta os resultados para o tráfego de vídeo também com ARB e os diferentes e sucessivos acréscimos de potência do ruído impulsivo.

Apesar do leve aumento de atraso na transmissão de vídeo, a perda de pacotes praticamente se manteve constante, não impactando assim o aumento de ruído impulsivo para este cenário analisado.

Tabela 4.5: Resultados medidos para vídeo – Cenário 2.

	ARB	2 dB	4 dB	6 dB	8 dB
Atraso (s)	0,01624	0,016356	0,016385	0,017346	0,019433
Perda de pacotes (%)	0,000977	0,00091	0,001036	0,000916	0,000921

Esta abordagem analisou o impacto de ruído impulsivo na transmissão de tráfego multimídia em um sistema ADSL2+. Um ponto que necessita ser melhor analisado é a inserção de mais ruídos simultaneamente no sistema, ou seja, além da inclusão de ruído impulsivo é interessante também incluir ruídos de *crosstalk* e, ocasionalmente, de rádio frequência (RFI – Radio Frequency Interference), a fim de tornar a análise mais próxima de um cenário real.

Os ruídos utilizados tiveram como fonte a modelagem realizada a partir dos estudos da BT/DT (British Telecom / Deutsch Telekom) [99]. Como o impacto de tais ruídos não foi perceptível, é necessário que a implementação destes ruídos no gerador de ruído seja revista.

4.1.3 Sistemas ADSL2+ – Cenário 3

Os resultados aqui apresentados foram obtidos com o cenário de medições descrito na Seção 3.1.3, o qual trata de analisar o impacto de dois tipos de ruídos impulsivos padronizados pelo ITU-T: C1 e C2. Tais ruídos são descritos em [103] e os mesmos são voltados para testes de desempenho de sistemas DSL.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as taxas de pacotes transmitidos e a quantidade de pacotes perdidos para a injeção de ruído C1 no lado CO para o tráfego de *downstream*, respectivamente.

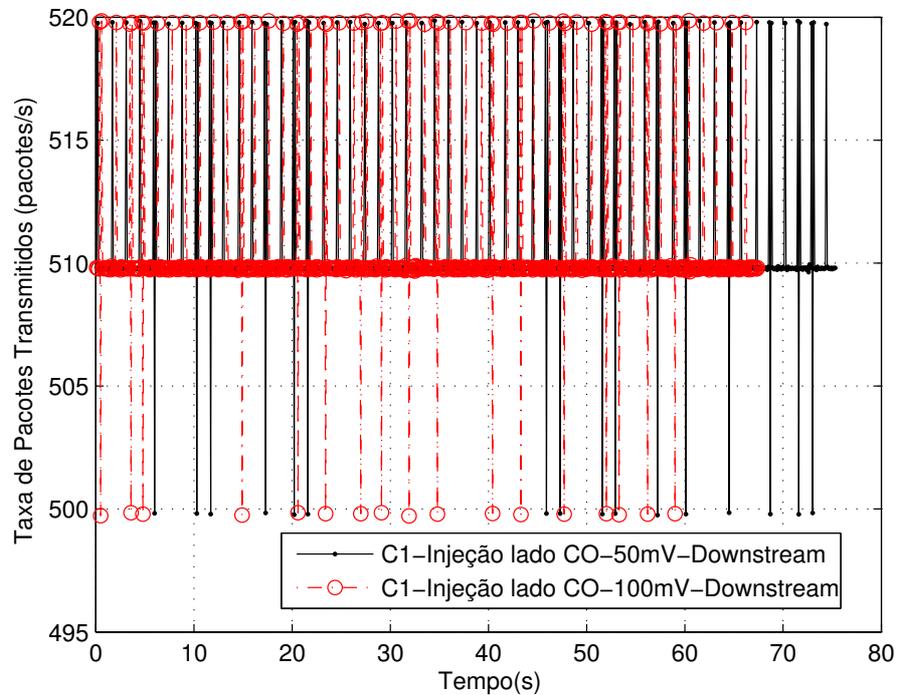


Figura 4.1: Taxa de pacotes transmitidos no downstream para a injeção de C1 no lado CO.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam as taxas de pacotes transmitidos e a quantidade de pacotes perdidos para a injeção de ruído C2 no lado CO para o tráfego de *downstream*, respectivamente.

Resultados similares foram obtidos para a injeção de ruídos C1 e C2 no lado CPE e também para tráfego de *upstream*.

Os resultados indicam que os ruídos impulsivos C1 e C2 não possuem impacto significativo na transmissão ADSL2+. Ou seja, apesar de serem indicados em [103] como referência de ruído impulsivo para realização de testes de desempenho em sistemas ADSL2+, a sua aplicabilidade, nos testes realizados, mostrou-se limitada.

Isto se deve ao fato que estes ruídos são voltados para confirmar se os modems ADSL2+ de um dado fabricante atendem os requisitos estipulados de desempenho do padrão ITU-T G.992.5 [70]. Os resultados indicam que os equipamentos utilizados atendem satisfatoriamente ao referido padrão.

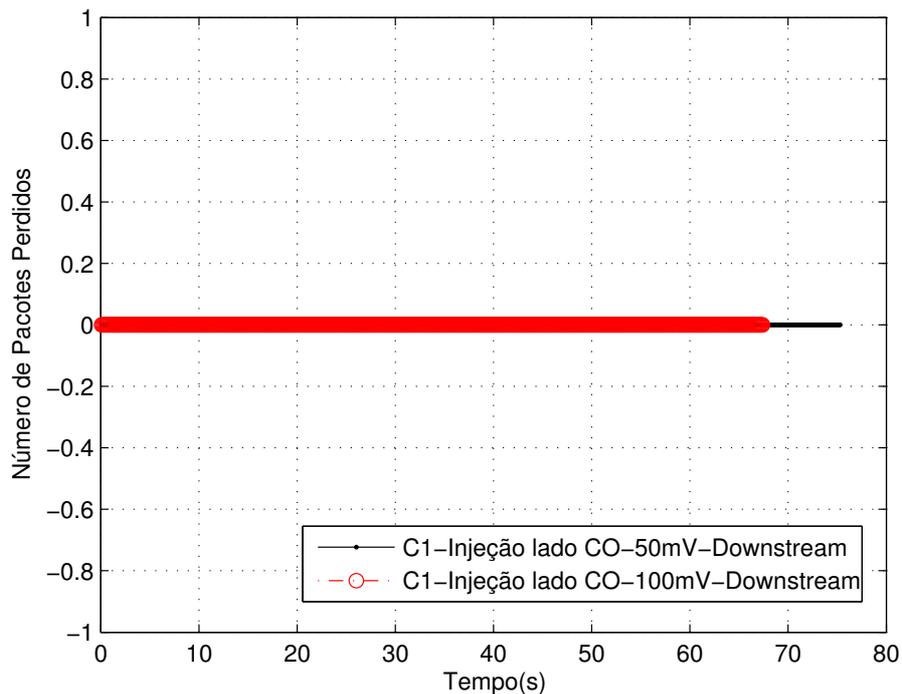


Figura 4.2: Taxa de pacotes perdidos no downstream para a injeção de C1 no lado CO.

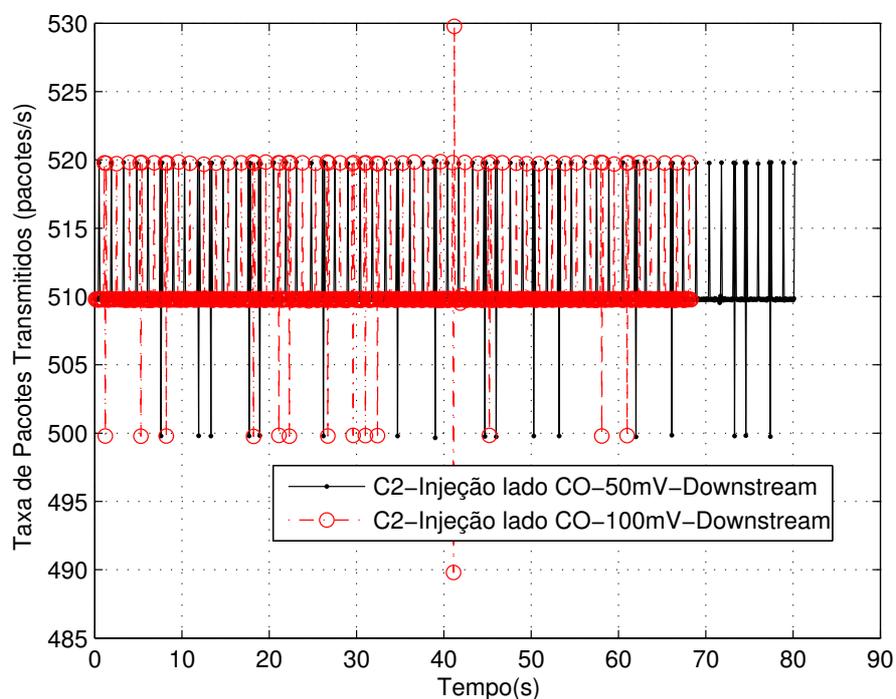


Figura 4.3: Taxa de pacotes transmitidos no downstream para a injeção de C2 no lado CO.

4.1.4 FBWNs – Cenário 4

Os resultados aqui apresentados foram obtidos com o cenário de medições descrito na Seção 3.1.4, o qual trata de medições de desempenho em uma FBWN quando ocorre

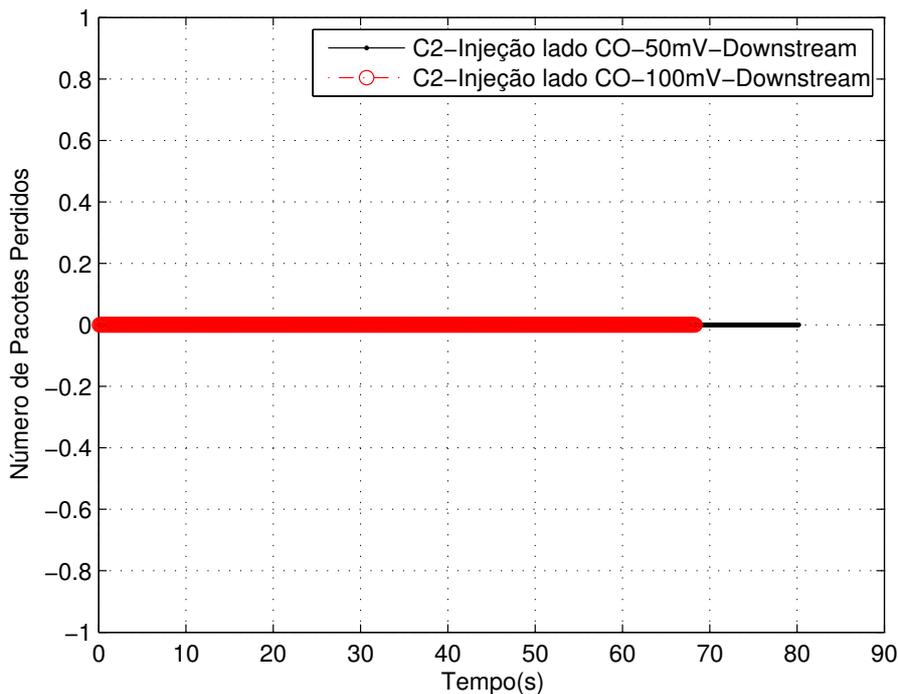


Figura 4.4: Taxa de pacotes perdidos no downstream para a injeção de C2 no lado CO.

a transmissão de tráfego multimídia gerado por um equipamento profissional de uso de uma emissora de televisão local.

Em relação aos dados coletados, utilizou-se um total de **30** amostras coletadas a cada **10** segundos, totalizando um tempo global de **5** minutos de coleta.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam a taxa de dados transmitida efetiva (*throughput*) e a latência média coletados durante as medições, respectivamente.

Na Figura 4.5 observa-se que o máximo *throughput* alcançado para as resoluções de 320x240 e 640x480 foi de **1128** kbps e **3734** kbps, respectivamente. Isto é esperado uma vez que o vídeo de melhor qualidade necessita ocupar uma maior capacidade do canal para ser transmitida.

A Figura 4.6 apresenta a latência medida para o vídeo de maior resolução (640x480). Obteve-se um valor máximo de **29** ms, um valor mínimo de **17** ms e um valor médio de **22** ms.

Para as **30** amostras coletadas, apenas uma única amostra foi descartada devido a demora excessiva na resposta (*timeout*). Os resultados para latência estão dentro dos requisitos aceitáveis de QoS, menor do que **100** ms, para este tipo de tráfego em tais redes [86].

A Tabela 4.6 apresenta o MOS obtido para os dois tipos de tráfego. Como obser-

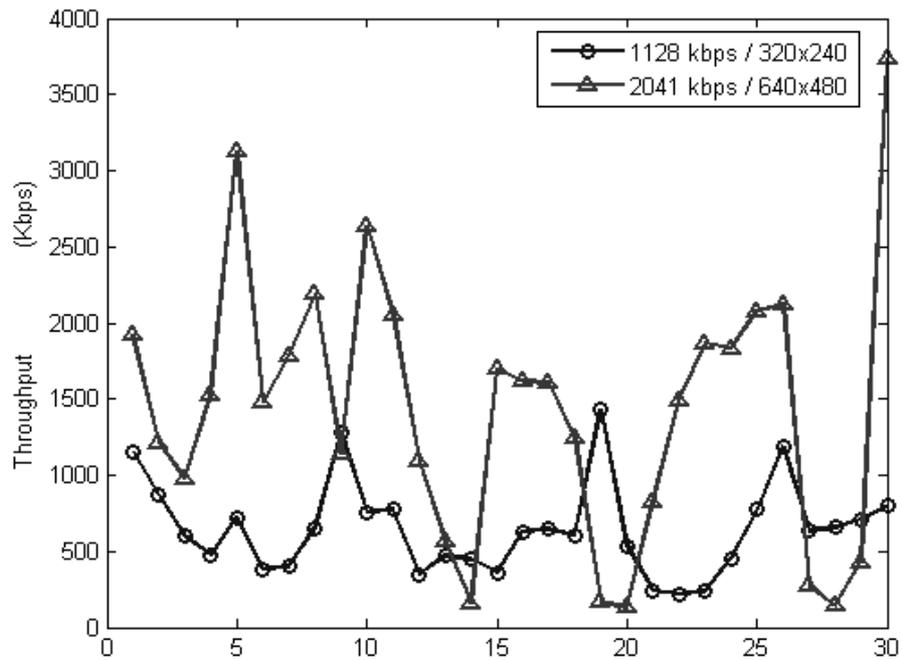


Figura 4.5: Vazão de dados (throughput) medida para os dois tipos de tráfego multimídia.

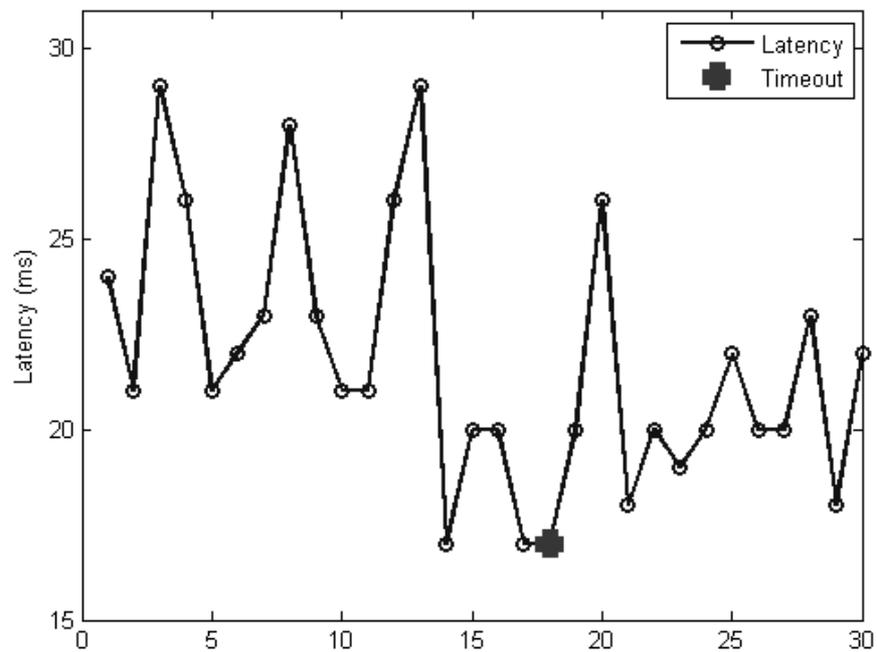


Figura 4.6: Latência medida para o vídeo com resolução de 640x480.

vado, os valores observados de MOS estão dentro dos parâmetros aceitáveis.

Os resultados indicam que a FBWN pode ser utilizada como canal de acesso

Tabela 4.6: Resultados obtidos do MOS para vídeo – Cenário 4.

Resolução de Vídeo	Taxa (kbps)	MOS
320x240	1128	3,5
640x480	2041	4,5

para transmissões de vídeo ao vivo. Isto é interessante pois permite que empresas de televisão possam utilizar uma infraestrutura de acesso sem fio com menor custo quando comparada aos tradicionais enlaces de satélite, os quais são normalmente utilizados em tais situações.

4.2 Modelagem

4.2.1 Sistemas DSL

Os resultados aqui apresentados foram obtidos com a modelagem descrita na Seção 3.2.1.

Simulações para o CAC proposto foram realizadas utilizando-se o programa computacional ModEsto [114]. Utilizando o algoritmo de iteração de valores foi obtida a política ótima estacionária para o sistema¹. Cerca de **175.098** estados foram gerados em cada simulação realizada.

Variação da Taxa de Chegada das Chamadas de Vídeo (λ_{vi})

A Figura 4.7 mostra a probabilidade de bloqueio para um tráfego MPEG-2 em relação ao incremento da taxa de chegada de vídeo. Devido a largura de banda disponível para este serviço, pode-se notar que a probabilidade de bloqueio rapidamente cresce quando λ_{vi} aumenta, o que era esperado.

A Figura 4.8 mostra a probabilidade de bloqueio para o tráfego de voz para um aumento de λ_{vi} . Pode-se perceber que para um baixo tráfego de vídeo, a política ótima mantém uma baixa probabilidade de bloqueio para as chamadas de voz.

Ao aumentar λ_{vi} , a probabilidade também aumenta, mas ainda assim os valores da probabilidade de bloqueio se mantêm baixos. Isto se deve ao fato que a largura de banda necessária por este tipo de serviço é muito baixa quando comparada a de tráfego de vídeo.

A Figura 4.9 mostra a probabilidade de bloqueio para o tráfego de dados. Como esperado, há um aumento do bloqueio quando há um aumento de λ_{vi} .

¹Para maiores detalhes, vide Apêndice B.1.

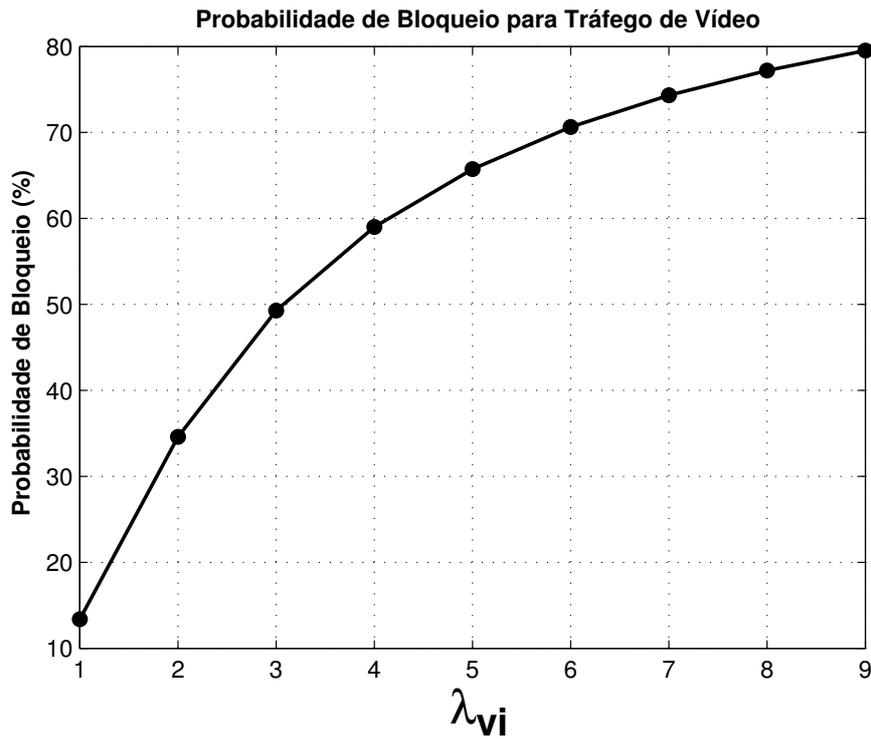


Figura 4.7: Probabilidade de bloqueio para tráfego de vídeo versus variação de λ_{vi} .

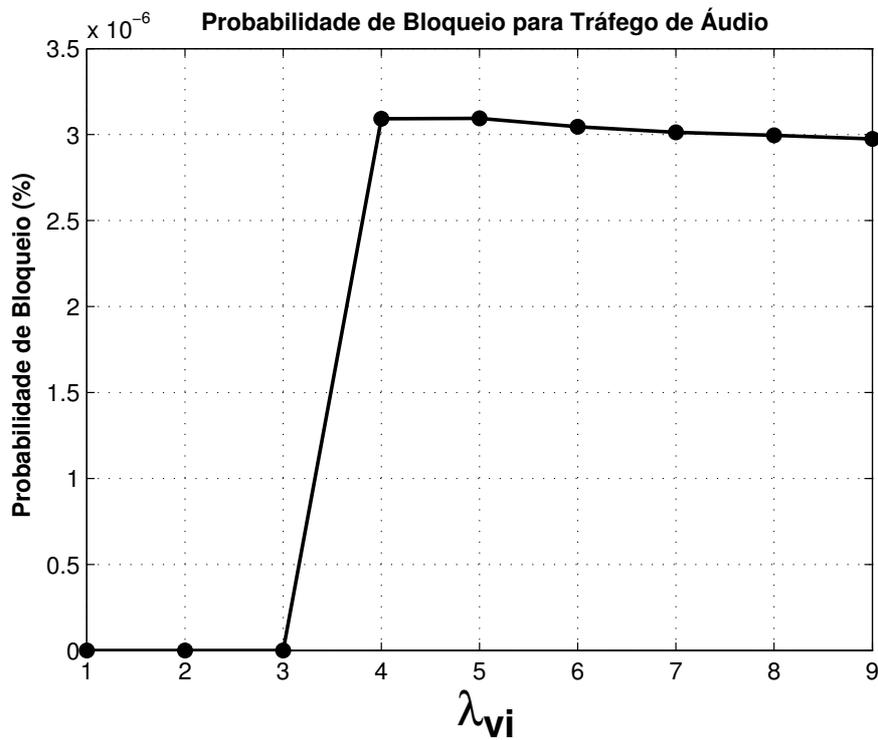


Figura 4.8: Probabilidade de bloqueio para tráfego de áudio versus variação de λ_{vi} .

Vale ressaltar que o tráfego de dados é transmitido no estilo melhor esforço (*best effort*), ou seja, não há preferência para este tipo de serviço em relação aos demais. Esta característica de melhor esforço pode levar o tráfego de dados a ser seriamente

degradado em sistemas onde as chamadas de tempo real não são otimamente controladas.

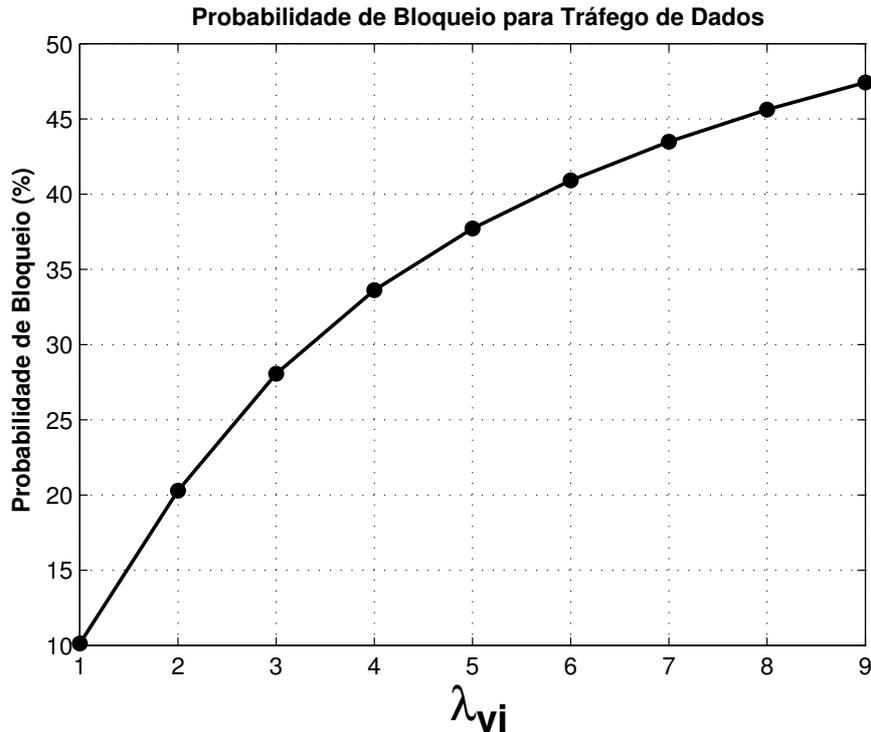


Figura 4.9: Probabilidade de bloqueio para tráfego de dados versus variação de λ_{vi} .

A Figura 4.10 mostra a utilização de recursos (U) para os três tipos de tráfego transmitidos. Voz e dados apresentam uma utilização quase constante de 6,5% e 0,13%, respectivamente.

Como esperado, o tráfego de vídeo possui uma alta utilização de recursos, visto que este necessita de uma maior largura de banda do sistema.

Varição da Taxa de Chegada das Chamadas de Áudio (λ_{vo})

A probabilidade de bloqueio de vídeo para a variação de λ_{vo} considerada se mostrou constante e assumindo um valor de cerca de **13,3%**. Tal resultado não é surpreendente pois a variação de λ_{vo} não ocupa mais do que 40% da largura de banda disponível no sistema, não impactando assim no bloqueio de uma chamada de vídeo.

Já a probabilidade de bloqueio das chamadas de dados se mostra extremamente baixa, como demonstra a Figura 4.11. Nesse caso mais uma vez, a taxa mínima exigida pelas chamadas de áudio ocasiona uma baixa probabilidade de bloqueio das mesmas.

Como ocorrido para o áudio, acontece o mesmo para a probabilidade de bloqueio de uma chamada de dados, como mostrado na Figura 4.12. Como ambas possuem

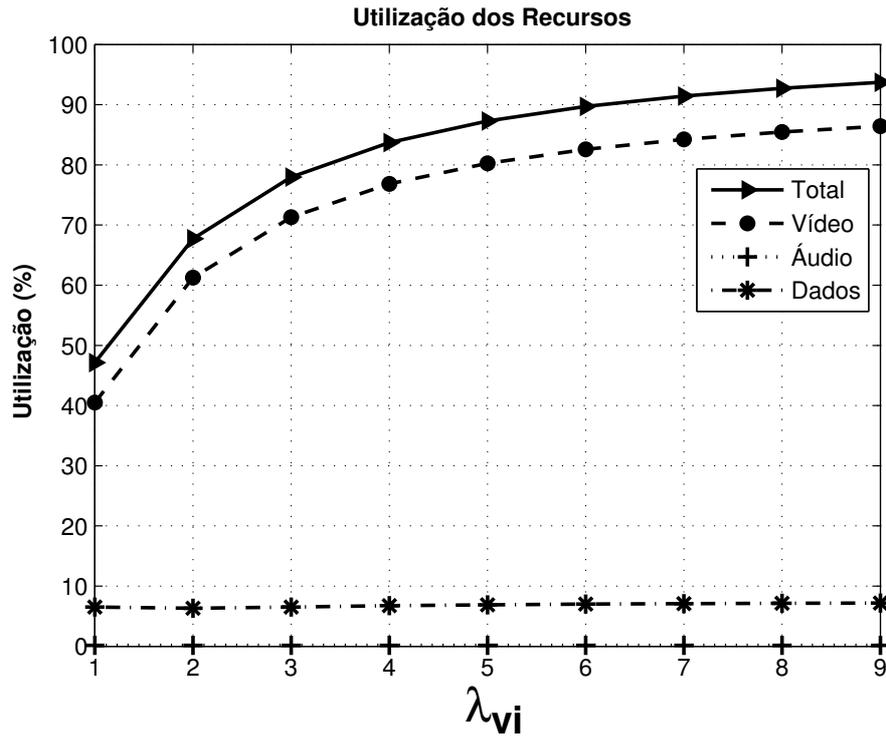


Figura 4.10: Utilização dos recursos versus variação de λ_{vi} .

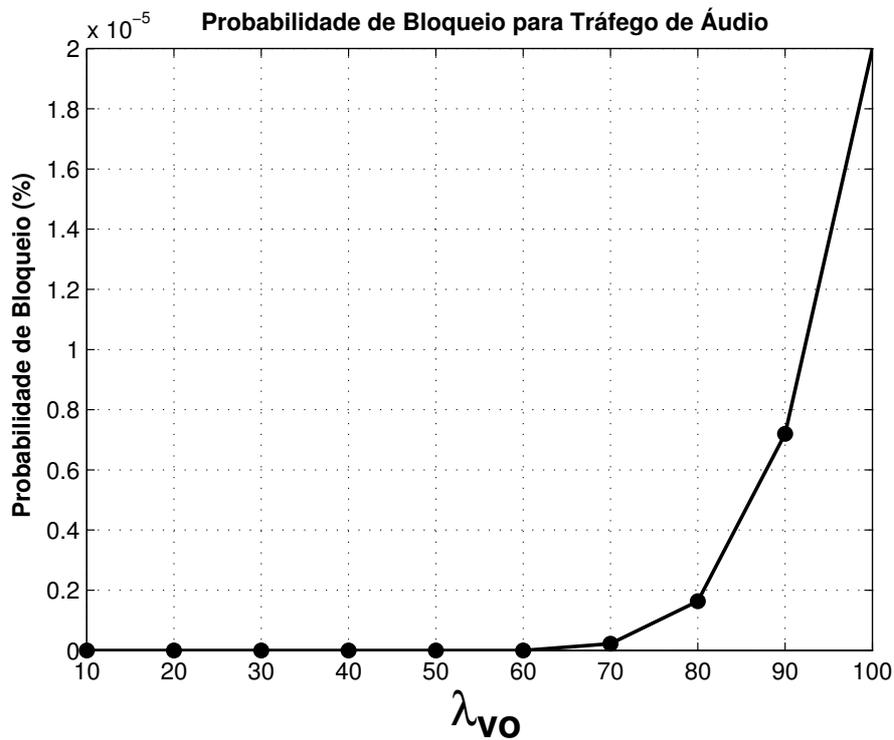


Figura 4.11: Probabilidade de bloqueio para tráfego de áudio versus variação de λ_{vo} .

uma taxa de dados similar, a probabilidade de bloqueio também apresenta um comportamento similar ao caso anterior.

A Figura 4.13 apresenta a utilização de recursos para o sistema em análise. Neste

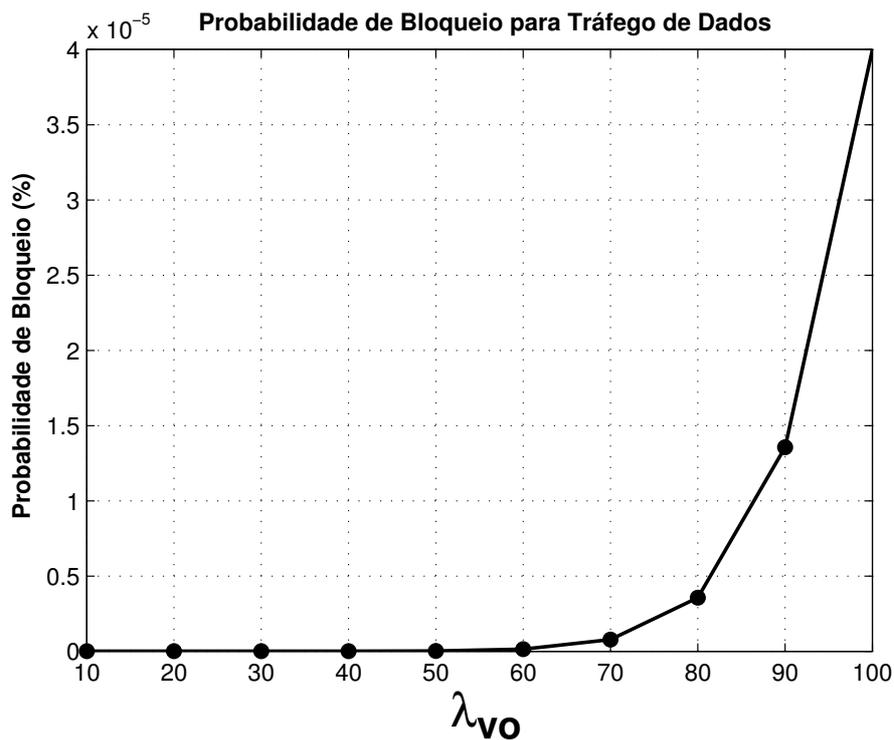


Figura 4.12: Probabilidade de bloqueio para tráfego de dados versus variação de λ_{vo} .

caso, mesmo a variação da taxa de chegada das chamadas de áudio teve pouco impacto na utilização total do sistema, cabendo as chamadas de vídeo uma maior ocupação de tais recursos.

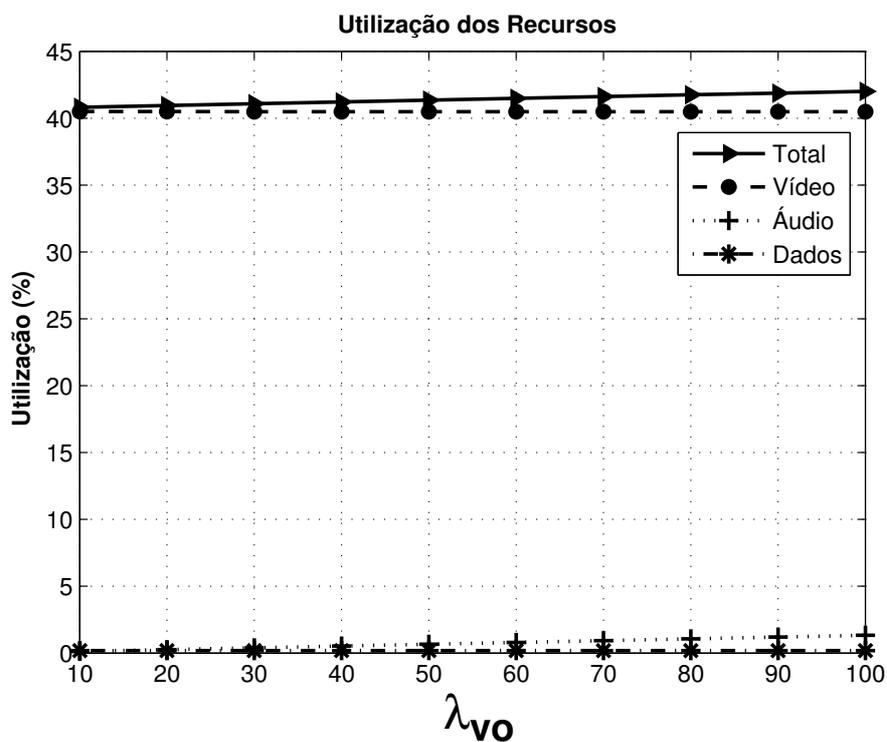


Figura 4.13: Utilização dos recursos versus variação de λ_{vo} .

4.2.2 FBWNs

Os resultados aqui apresentados foram obtidos com a modelagem descrita na Seção 3.2.2.

Simulações para o CAC proposto foram realizadas utilizando-se o programa computacional ModEsto [114]. Utilizando o algoritmo de iteração de valores foi obtida a política ótima estacionária para o sistema. Cerca de **900** estados foram gerados em cada simulação realizada.

Na Figura 4.14 são apresentadas as probabilidades de bloqueio para os serviços HQV, LQV e ICs em comparação com as probabilidades obtidas por [46] para os tráfegos BE e rtPS.

Os resultados mostram que o CAC proposto possui um melhor desempenho global para os três tipos de tráfego. Em particular, o serviço HQV possui uma menor probabilidade de bloqueio do que o tráfego rtPS.

Devido a prioridade preemptiva considerada sobre os serviços IC, o desempenho deste tipo de serviço é inferior ao tráfego BE para limiares abaixo de **0,012** chamadas por segundo, ou seja, **43** chamadas por hora.

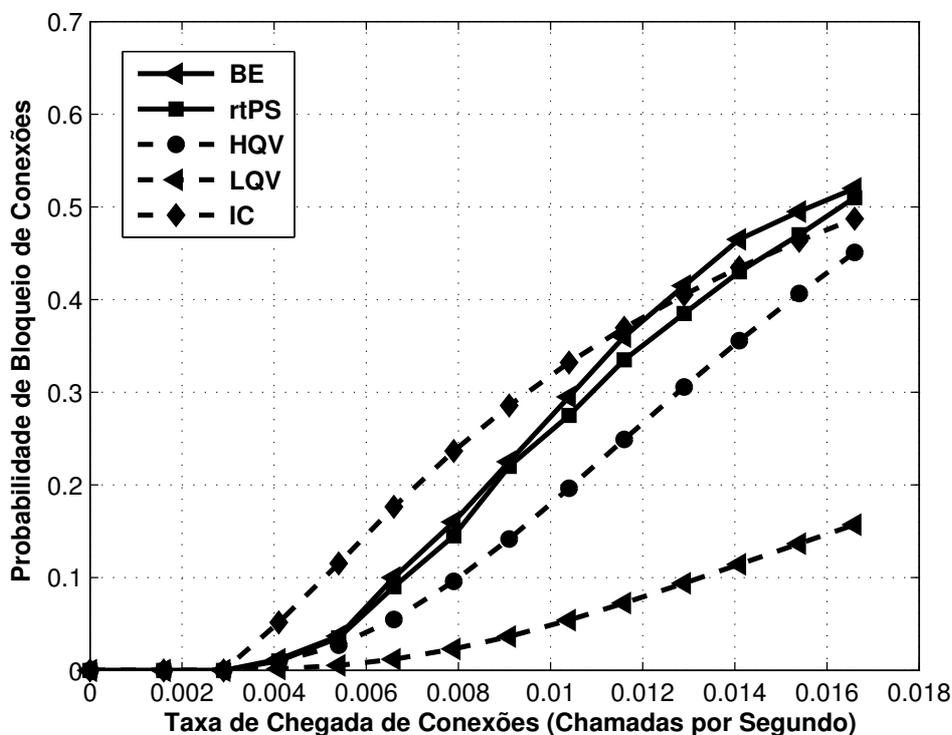


Figura 4.14: Probabilidade de bloqueio para o tráfego total utilizando o CAC proposto.

A Figura 4.15 apresenta a utilização dos recursos para a transmissão de vídeo

(serviços HQV e LQV) quando o CAC proposto é utilizado.

Mantendo-se a mesma taxa de chegadas ao sistema, pode-se observar que ainda existem recursos disponíveis para uso, permitindo assim o incremento da taxa de chegada de novas chamadas ao sistema (sejam elas de vídeo ou dados).

Desta forma, é possível uma maior capacidade de utilização do sistema. A utilização de recursos dos serviços HQV tende a se estabilizar devido a limitação considerada de **20%** destas conexões no sistema.

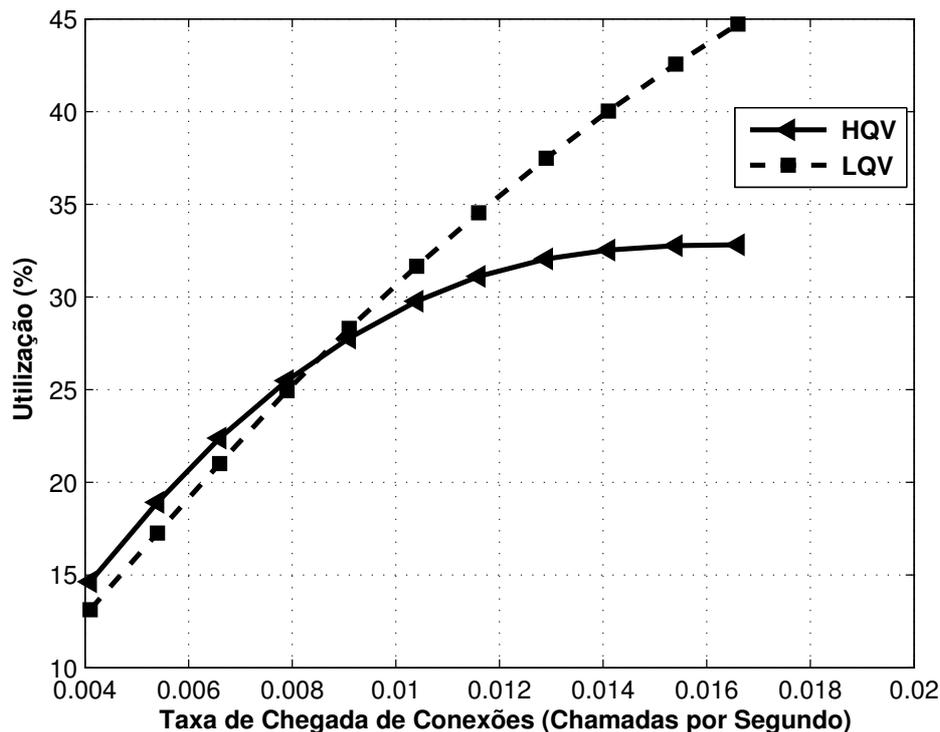


Figura 4.15: Utilização de recursos utilizando o CAC proposto.

Através do CAC proposto e dos resultados anteriormente obtidos, é possível estabelecer limiares de utilização para serviços de vídeo em um FBWN, em particular, para serviços HQV.

Para uma FBWN com $B = 19$ Mbps utilizando diferentes taxas de dados para transmissão de vídeo (Tabela 4.7 [37]), a Figura 4.16 apresenta os resultados para os dois tipos de *codec* considerados.

Neste caso, o valor de 5 Mbps mostra ser um valor adequado para definir um serviço de vídeo como HQV, pois a probabilidade de bloqueio para 43 chamadas por hora é menor do que 40%. Já a taxa de dados de 1 Mbps para serviços LQV se mostra totalmente suficiente, pois para 43 chamadas por hora, a probabilidade de bloqueio não chega a 10%.

Tabela 4.7: Possíveis taxas de dados para os serviços de vídeo.

Serviço	Codec	Taxa (Mbps)
HQV	<i>MPEG-4 AVC (high definition-HD)</i>	[15, 5]
LQV	<i>MPEG-4 AVC (standard definition-SD)</i>	[4, 1]

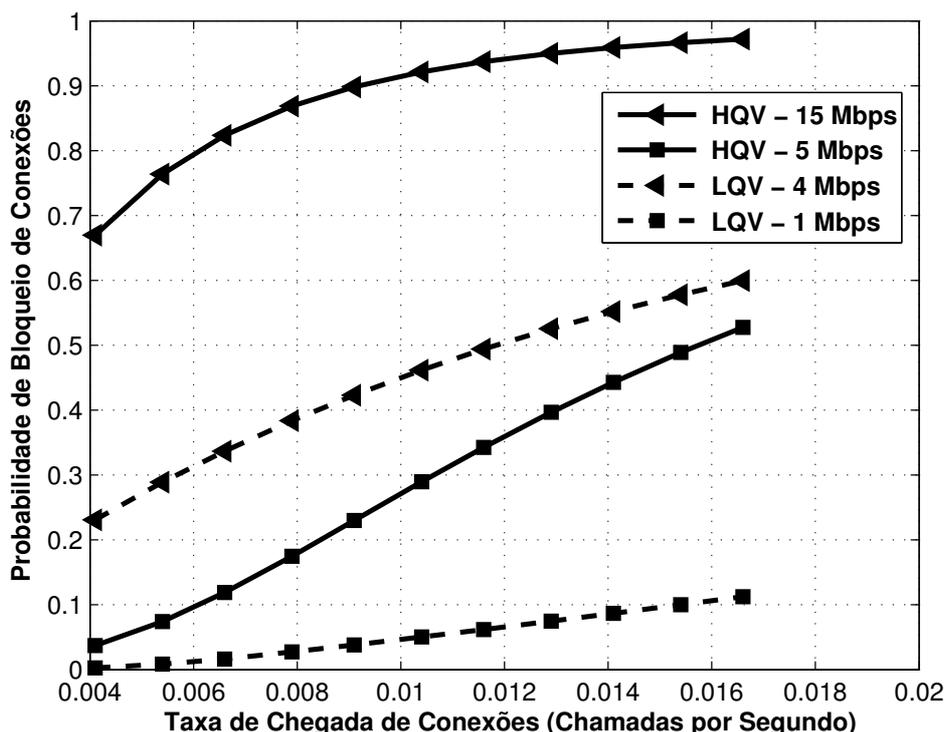


Figura 4.16: Probabilidade de bloqueio para diferentes taxas de dado para vídeo.

Para analisar os impactos dos limiares de vídeo escolhidos e do percentual de serviços HQV no tráfego total do sistema, fixa-se a taxa de chegada de novas conexões a **0,01** conexões por segundo (36 chamadas por hora) e se utiliza uma taxa de dados para os serviços HQV e LQV de **5** Mbps e **1** Mbps, respectivamente. A Figura 4.17 apresenta os resultados alcançados.

Até **50%** de conexões HQV no tráfego total do sistema mostra-se um ponto ótimo para transmissão multimídia satisfatória em FBWNs, visto que, a partir deste percentual, as probabilidades de bloqueio para os serviços de vídeo e IC assumem valores cada vez mais altos.

Os serviços IC possuem uma probabilidade de bloqueio cada vez maior pois, devido a prioridade preemptiva considerada sobre estes serviços, cada vez menos largura de

banda é disponibilizada para tais serviços e menos tráfego deste tipo é permitido na rede. Em um determinado limiar, $p > 90\%$, não há largura de banda suficiente para os serviços LQV e daí sua probabilidade de bloqueio ser de **100%**.

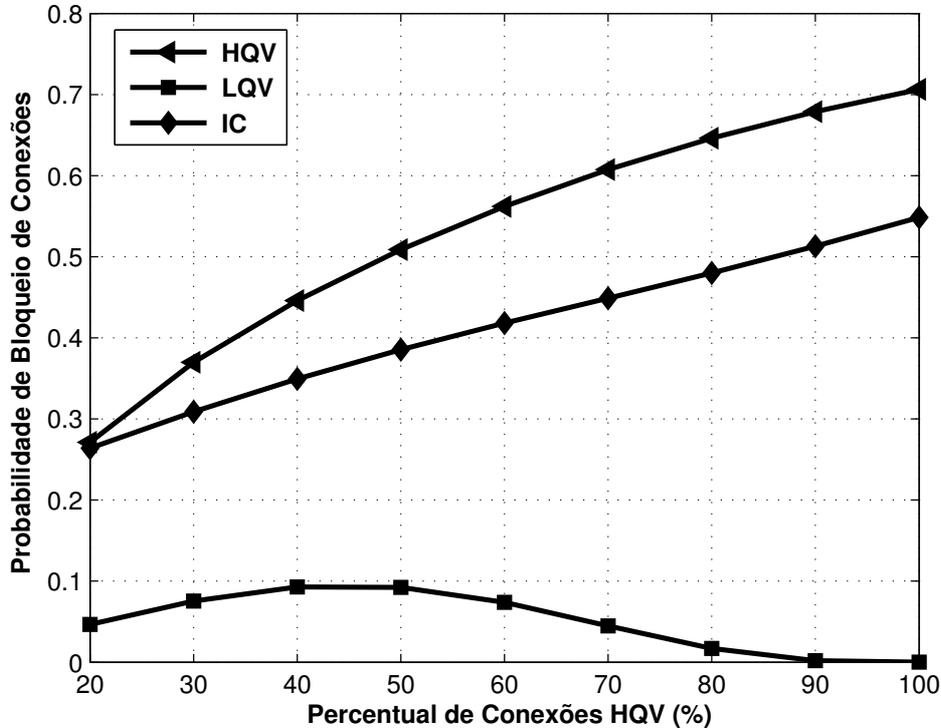


Figura 4.17: Impacto dos serviços HQV nas probabilidades de bloqueio de tráfego.

Utilizando os parâmetros anteriores, a Figura 4.18 apresenta o impacto dos serviços HQV na utilização de recursos do sistema para o CAC proposto.

Novamente, o valor de **50%** mostra-se com o ponto ótimo de utilização, uma vez que a utilização total de recursos é por volta de **86%**.

Observa-se que a utilização de recursos para os serviços LQV é cada vez menor, à medida que se aumentam os recursos para os serviços HQV. Os serviços IC possuem uma variação pouco acentuada na utilização dos recursos, característico mais uma vez da prioridade preemptiva considerada para este tipo de tráfego.

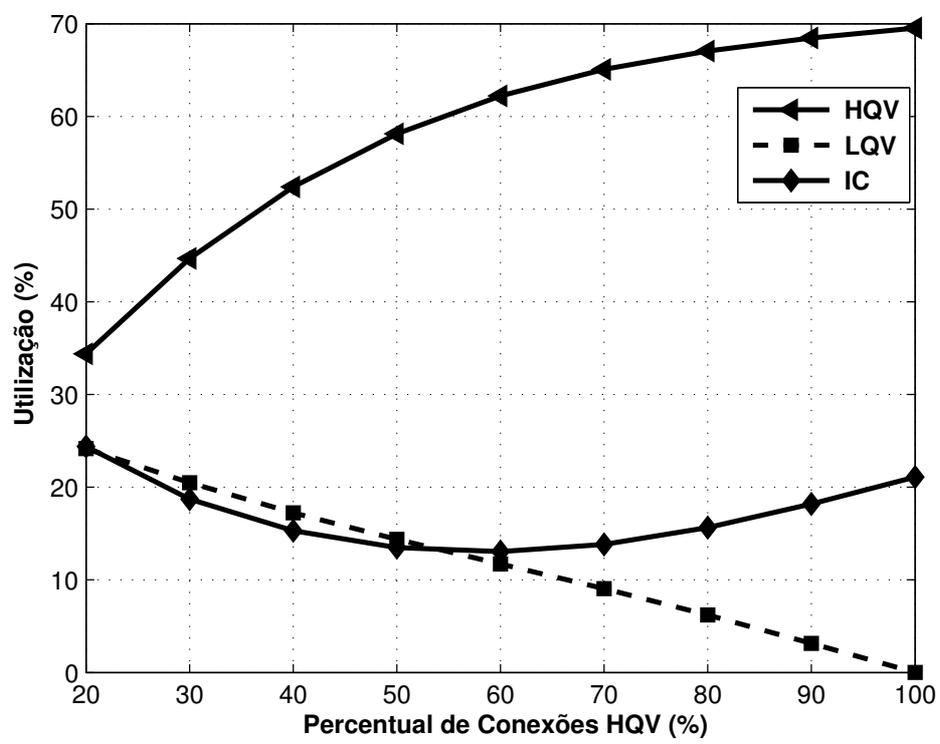


Figura 4.18: Impacto dos serviços HQV na utilização de recursos.

+

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Conclusões

Esta Tese apresentou uma metodologia para avaliação de desempenho em redes de acesso banda larga. Dois tipos de redes de acesso foram analisadas: redes ADSL2+, as quais são redes cabeadas que utilizam cabos metálicos de pares trançados; e redes FBWN, as quais são redes sem fio (*wireless*) baseadas no padrão IEEE 802.16.

A abordagem baseada em medições analisou um total de 4 cenários: Cenário 1 – ADSL2+; Cenário 2 – ADSL2+; Cenário 3 – ADSL2+ e Cenário 4 – FBWN.

A abordagem baseada em modelagem utilizou 2 tipos de formulações matemáticas: ADSL2+ utilizando um PSMD e FBWN utilizando uma CMTTC.

Cenário 1 – ADSL2+

Neste cenário, detalhado na Seção 3.1.1, parâmetros de rede tais como taxa de dados e *delay* tanto para *downstream* quanto para *upstream* foram coletados durante a transmissão de um tráfego genérico.

Os resultados obtidos são úteis para estabelecer valores básicos característicos de cenários ADSL2+, os quais podem ser usados como parâmetros de configuração para simuladores de rede tais como o NS-2 ou NS-3, aumentando assim a confiabilidade e abrangência das análises realizadas.

Cenário 2 – ADSL2+

Neste cenário, detalhado na Seção 3.1.2, é analisado o impacto de um ruído não estacionário, definido através de medições da BT/DT [99], na transmissão de tráfego multimídia no sistema.

Através de ferramentas de uso livre na Internet e voltadas para a geração e análise de tráfego *triple play*, observou-se que o ruído não estacionário utilizado nas medições

teve pouco impacto na transmissão de tráfego analisada.

Para o tráfego VoIP, os índices de MOS observados estão em valores aceitáveis, pois permitem a realização das chamadas VoIP mesmo com a presença perceptível de interferências na transmissão. O *jitter* médio não sofreu grandes variações (um máximo de 4,36% em relação ao maior valor medido), não impactando assim decisivamente na qualidade da transmissão.

A inserção de ruído foi menos perceptível ainda para o tráfego HTTP, pois as métricas coletadas tiveram pouca alteração para este tipo de tráfego.

Apesar do leve aumento de atraso na transmissão de vídeo, a perda de pacotes praticamente se manteve constante, não impactando assim o aumento de ruído impulsivo para este cenário analisado.

Um ponto que necessita ser melhor analisado é a inserção de mais ruídos simultaneamente no sistema, ou seja, além da inclusão de ruído impulsivo é interessante também incluir ruídos de *crosstalk* e, ocasionalmente, de RFI, a fim de tornar a análise mais próxima de um cenário real.

Os ruídos utilizados tiveram como fonte a modelagem realizada a partir dos estudos da BT/DT [99]. Como o impacto de tais ruídos não foi perceptível, é necessário que a implementação destes ruídos no gerador de ruído DLS 5500 seja revista.

Cenário 3 – ADSL2+

Neste cenário, detalhado na Seção 3.1.3, outros dois tipos de ruído definidos pela recomendação ITU-T G.996.1 [103] são analisados em relação ao seu impacto quando da transmissão de um tráfego genérico na rede.

Os resultados indicam que os ruídos impulsivos C1 e C2 não possuem impacto significativo na transmissão ADSL2+. Ou seja, apesar de serem indicados em [103] como referência de ruído impulsivo para realização de testes de desempenho em sistemas ADSL2+, a sua aplicabilidade, nos testes realizados, mostrou-se limitada.

Isto se deve ao fato que estes ruídos são voltados para confirmar se os modems ADSL2+ de um dado fabricante atendem os requisitos estipulados de desempenho do padrão ITU-T G.992.5 [70]. Os resultados indicam que os equipamentos utilizados atendem ao referido padrão.

Cenário 4 – FBWN

Neste cenário, detalhado na Seção 3.1.4, um tráfego multimídia gerado por uma câmera de vídeo profissional é analisado a fim de verificar a viabilidade de uso deste

tipo de rede de acesso como meio de transmissão para o tráfego de uma emissora de televisão local.

Observou-se que o máximo *throughput* alcançado para as resoluções de 320x240 e 640x480 foi de **1128** kbps e **3734** kbps, respectivamente. Isto é esperado uma vez que o vídeo de melhor qualidade necessita ocupar uma maior capacidade do canal para ser transmitida.

Em relação a latência medida para o vídeo de maior resolução (640x480), obteve-se um valor máximo de **29** ms, um valor mínimo de **17** ms e um valor médio de **22** ms.

Para as 30 amostras coletadas, apenas uma única amostra foi descartada devido a demora excessiva na resposta (*timeout*). Os resultados para latência estão dentro dos requisitos aceitáveis de QoS, menor do que **100ms**, para este tipo de tráfego em tais redes [86].

A Tabela 4.6 apresenta o MOS medido para os dois tipos de tráfego. Como observado, os valores observados de MOS estão dentro dos parâmetros aceitáveis.

Modelagem – ADSL2+ utilizando um PSMD

A escolha de um PSMD se deve ao fato de que o período de tempo entre dois instantes consecutivos de decisão no sistema em análise não é determinístico, ou seja, o tempo entre os instantes de decisão pode seguir uma distribuição de probabilidade arbitrária.

A Figura 4.7 mostra a probabilidade de bloqueio para um tráfego MPEG-2 em relação ao incremento da taxa de chegada de vídeo. Devido a largura de banda disponível para este serviço, pode-se notar que a probabilidade de bloqueio rapidamente cresce quando λ_{vi} aumenta, o que era esperado.

A Figura 4.8 mostra a probabilidade de bloqueio para o tráfego de voz para um aumento de λ_{vi} . Pode-se perceber que para um baixo tráfego de vídeo, a política ótima mantém uma baixa probabilidade de bloqueio para as chamadas de voz. Ao aumentar λ_{vi} , a probabilidade também aumenta, mas ainda assim os valores da probabilidade bloqueio se mantêm baixos. Isto se deve ao fato que a largura de banda necessária por este tipo de serviço é muito baixa quando comparada a de tráfego de vídeo.

A Figura 4.9 mostra a probabilidade de bloqueio para o tráfego de dados. Como esperado, há um aumento do bloqueio quando há um aumento de λ_{vi} . Vale ressaltar que o tráfego de dados é transmitido no estilo melhor esforço (*best effort*), ou seja, não há preferência para este tipo de serviço em relação aos demais. Esta característica de

melhor esforço pode levar o tráfego de dados a ser seriamente degradado em sistemas onde as chamadas de tempo real não são otimamente controladas.

A Figura 4.10 mostra a utilização de recursos (U) para os três tipos de tráfego transmitidos. Voz e dados apresentam uma utilização quase constante de 6,5% e 0,13 %, respectivamente. Como esperado, o tráfego de vídeo possui uma alta utilização de recursos, visto que este necessita de uma maior largura de banda do sistema.

A probabilidade de bloqueio de vídeo para a variação de λ_{vo} considerada se mostrou constante e assumindo um valor de cerca de 13,3 %. Tal resultado não é surpreendente pois a variação de λ_{vo} não ocupa mais do que 40 % da largura de banda disponível no sistema, não impactando assim no bloqueio de uma chamada de vídeo.

Já a probabilidade de bloqueio das chamadas de dados se mostra extremamente baixa, como demonstra a Figura 4.11. Nesse caso mais uma vez, a taxa mínima exigida pelas chamadas de áudio impacta em uma baixa probabilidade de bloqueio das mesmas.

Da mesma forma como ocorrido para áudio, acontece para a probabilidade de bloqueio de uma chamada de dados, como mostrado na Figura 4.12. Como ambas possuem uma taxa de dados similar, a probabilidade de bloqueio também apresenta um mesmo comportamento.

A Figura 4.13 apresenta a utilização de recursos para o sistema em análise. Neste caso, mesmo a variação da taxa de chegada das chamadas de áudio teve pouco impacto na utilização total do sistema, cabendo as chamadas de vídeo uma maior ocupação de tais recursos.

O custo da política ótima se manteve constante para a variação de λ_{vo} , com um valor de **0,00037**. Os resultados para a variação da taxa de chegada das chamadas de áudio apresentam comportamentos esperados mesmo quando se pensa na chegada de 100 chamadas de áudio em uma hora, o que corresponde a uma taxa de dados máxima de **6,4** Mbps, cerca de 40 % da taxa máxima disponível no sistema.

Modelagem – FBWN utilizando um CMT

Na Figura 4.14 são apresentadas as probabilidades de bloqueio para os serviços HQV, LQV e ICs em comparação com as probabilidades obtidas por [46] para os tráfegos BE e rtPS.

Os resultados mostram que o CAC proposto possui um melhor desempenho global para os três tipos de tráfego. Em particular, o serviço HQV possui uma menor probabilidade de bloqueio do que o tráfego rtPS.

Devido a prioridade preemptiva considerada sobre os serviços IC, o desempenho deste tipo de serviço é inferior ao tráfego BE para limiares abaixo de **0,012** chamadas por segundo, ou seja, **43** chamadas por hora.

A Figura 4.15 apresenta a utilização dos recursos para a transmissão de vídeo (serviços HQV e LQV) quando o CAC proposto é utilizado.

Mantendo-se a mesma taxa de chegadas ao sistema, pode-se observar que ainda existem recursos disponíveis para uso, permitindo assim o incremento da taxa de chegada de novas chamadas ao sistema (sejam elas de vídeo ou dados), e com isso possibilitando uma maior capacidade de utilização do mesmo. A utilização de recursos dos serviços HQV tende a se estabilizar devido a limitação considerada de **20%** destas conexões no sistema.

Através do CAC proposto e dos resultados anteriormente obtidos, é possível estabelecer limiares de utilização para serviços de vídeo em um FBWN, em particular, para serviços HQV.

Para uma FBWN com $B = 19$ Mbps utilizando diferentes taxas de dados para transmissão de vídeo (Tabela 4.7 [37]), a Figura 4.16 apresenta os resultados para os dois tipos de codec considerados.

Neste caso, o valor de **5** Mbps mostra ser um valor adequado para definir um serviço de vídeo como HQV, pois a probabilidade de bloqueio para **43** chamadas por hora é menor do que **40%**. Já a taxa de dados de **1** Mbps para serviços LQV se mostra totalmente suficiente, pois para **43** chamadas por hora, a probabilidade de bloqueio não chega a **10%**.

Para analisar os impactos dos limiares de vídeo escolhidos e do percentual de serviços HQV no tráfego total do sistema, fixa-se a taxa de chegada de novas conexões a 0,01 conexões por segundo (36 chamadas por hora) e se utiliza uma taxa de dados para os serviços HQV e LQV de **5** Mbps e **1** Mbps, respectivamente. A Figura 4.17 apresenta os resultados alcançados.

Até **50%** de conexões HQV no tráfego total do sistema mostra-se um ponto ótimo para transmissão multimídia satisfatória em FBWNs, visto que, a partir deste percentual, as probabilidades de bloqueio para os serviços de vídeo e IC assumem valores cada vez mais altos.

Os serviços IC possuem uma probabilidade de bloqueio cada vez maior pois, devido a prioridade preemptiva considerada sobre estes serviços, cada vez menos largura de banda é disponibilizada para tais serviços e menos tráfego deste tipo é permitido na rede.

Em um determinado limiar, $p > 90\%$, não há largura de banda suficiente para os serviços LQV e daí sua probabilidade de bloqueio ser de **100%**.

Utilizando os parâmetros anteriores, a Figura 4.18 apresenta o impacto dos serviços HQV na utilização de recursos do sistema para o CAC proposto.

Novamente, o valor de **50%** mostra-se com o ponto ótimo de utilização, uma vez que a utilização total de recursos é por volta de **86%**.

Observa-se que a utilização de recursos para os serviços LQV é cada vez menor, à medida que se aumentam os recursos para os serviços HQV. Os serviços IC possuem uma variação pouco acentuada na utilização dos recursos, característico mais uma vez da prioridade preemptiva considerada.

5.2 Trabalhos Futuros

O desenvolvimento de metodologias para avaliação de desempenho em redes de acesso banda larga é um assunto relevante.

Alguns aspectos podem ser abordados como continuação do tema analisado nesta Tese. Pode-se citar, por exemplo: o impacto da mobilidade no sistema FBWN; a utilização de CAC em redes heterogêneas; análise de sistemas VDSL/VDSL2; simulação computacional dos sistemas analisados utilizando ambientes tais como o NS-2 [115], NS-3 [116] ou o OEFMON (Open Evaluation Framework for Multimedia over Networks) [117], por exemplo.

As FBWNs consideradas não possuem mobilidade em seus CPEs, ou seja, a transmissão de dados ocorre com os seus CPEs totalmente estáticos. O acréscimo de mobilidade ao ambiente considerado traz alguns desafios:

- Como se comportará o CAC com o acréscimo da codificação e modulação adaptativa (AMC – Adaptive Modulation Coding)? a qual é uma ferramenta que possibilita ajustar a transmissão, de acordo com a necessidade do usuário, de acordo com algumas características do canal de propagação;
- Quais adaptações serão necessárias ao CAC? pois agora haverá uma ferramenta do próprio padrão IEEE 802.16 trabalhando para amenizar eventuais distorções no canal de rádio.

A utilização de redes heterogêneas em uma mesma área de cobertura traz novos aspectos a serem considerados para gerência de recursos do sistema, pois o usuário pode migrar, por exemplo, de uma rede *wi-fi* para uma rede *WiMAX* de acordo com

a disponibilidade momentânea da rede, voltando para a sua rede original após um determinado período de tempo.

Questões relacionadas ao desempenho da rede, tais como quais serviços devem ser priorizados e quais regras deverão existir para que usuários tenham uma maior largura de banda no sistema, necessitam ser melhor analisadas para redes heterogêneas.

A análise de redes VDSL/VDSL2, tanto por medições quanto por modelagem, seria uma continuação natural deste trabalho, visto que a rede de acesso cabeada (ADSL2+) abordada nesta Tese é utilizada grandemente no Brasil, mas em países da Europa e nos Estados Unidos da América a tendência de utilização é das tecnologias VDSL/VDSL2.

O uso de ferramentas de simulação computacional permite uma compreensão mais detalhada do comportamento de sistemas complexos [118]. Desta forma, a implementação das redes de acesso analisadas em ambientes de simulação, tais como o NS-2, NS-3, o OEFMON ou outros similares, possibilitaria uma maior compreensão de particularidades do sistema, tais como o comportamento quando da extrapolação do número de usuários ou de um tipo de tráfego específico, pois se teria acesso a outras métricas e análises até então não abordadas.

5.3 Contribuições

As contribuições principais desta Tese podem ser descritas abaixo:

- Definição de uma metodologia para análise de desempenho em redes de acesso baseada em medições e modelagem;
- Estabelecimento de cenários de medições para análise de tráfego em redes de acesso cabeada (DSL) e sem fio (FBWN). Estes cenários permitem que parâmetros físicos que são característicos da rede sejam coletados e analisados a fim de determinar a melhor forma de utilização da rede analisada;
- Indicação de utilização de ferramentas computacionais em conjunto com equipamentos de medição, de tal forma que os exemplos indicados para um cenário podem ser utilizados em outras configurações semelhantes em outros tipos de redes de acesso;
- Modelagem via Teoria Markoviana dos sistemas analisados, onde os diferentes tipos de tráfego com características específicas são analisados e modelados. Esta modelagem permite que os recursos dos sistemas sejam melhor aproveitados, ou

seja, a utilização dos recursos disponíveis é garantida em níveis satisfatórios. O resultado desta modelagem permite uma maior flexibilidade de implementação nas plataformas computacionais que podem vir a ser utilizadas, ocasionando uma maior abrangência da solução apresentada;

- Análise e discussão dos aspectos práticos de implantação da modelagem em redes ADSL2+ e FBWNs, abordando alguns problemas comumente encontrados na utilização e gerência destas redes.

5.4 Trabalhos Gerados

Os estudos e resultados expostos nesta Tese foram também apresentados nos congressos/conferências ou estão contidos nos relatórios técnicos e capítulo de livro detalhados na Tabela 1.1.

Referências Bibliográficas

- [1] *White Spaces and Mobile Communications*. Strategic White Paper – Alcatel-Lucent Telecommunications, February 2011.
- [2] *Enabling Digital Media Content Delivery – Emerging Opportunities for Network Service Providers*. Strategic White Paper – Alcatel-Lucent Telecommunications, March 2010.
- [3] Y. Utsumi. *Broadband for All*. White Paper – Alcatel-Lucent Telecommunications, September 2006.
- [4] A. Hernandez, P. Capelastegui, E. Vazquez, F. Gonzalez, and A. Poorter. *Design and Implementation of IP Multimedia Subsystem Applications: An Enabler-oriented Approach*. *IEEE Communications Magazine*, 49:44–51, August 2011.
- [5] A. Wahi, F. Lejay, P. Vittone, and P. Kumar. *WiMax End-User Devices: Enabling Broadband for All*. White Paper – Alcatel-Lucent Telecommunications, September 2006.
- [6] S. Lim, J. Seok, and H. Lee. *A Path Control Architecture for Receiving various Multimedia Contents*. In *8th International Conference on Advanced Communication Technology 2006*, volume 3, pages 1604–1607, February 2006.
- [7] C. Z.-W. Qiang. *Broadband Infrastructure Investment in Stimulus Packages: Relevance for Developing Countries*. World Bank, May 2009.
- [8] ITU-R. *Technical and Operational Characteristics and Applications of Broadband Wireless Access in the Fixed Service*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, November 2010.
- [9] A. Urie, V. Munière, J. Bogaert, and M. Levy. *Combining Access Technologies to Stay Best Connected*. White Paper – Alcatel-Lucent Telecommunications, September 2006.

- [10] B. Olsen, D. Katsianis, D. Varoutas, K. Stordahl, J. Harno, N. Elnegaard, I. Welling, F. Loizillon, T. Monath, and P. Cadro. *Technoeconomic Evaluation of the Major Telecommunication Investment Options for European Players*. *IEEE Network*, 20:6–15, July–August 2006.
- [11] European Commission. *Broadband coverage in Europe in 2011 – Mapping progress towards the coverage objectives of the Digital Agenda*. Technical report, European Commission DG Communications Networks, Content & Technology, 2012.
- [12] ITU. *Key statistical highlights: ITU data release June 2012*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, June 2012.
- [13] Teleco Inteligência em Telecomunicações. *Perfil dos Usuários de Internet no Brasil*. http://www.teleco.com.br/internet_usu.asp, Último acesso em: 26/11/2011.
- [14] Cisco. *Barômetro Cisco de Banda Larga Brasil 2005-2010*. http://www.cisco.com/web/BR/barometro/barometro.html?sid=150358_1, Último acesso em: 26/11/2011.
- [15] D. Arenas, C. Caldas, C. Ramundo, S. Vargas, and L. Hostos. *Challenges to expanding Fixed Broadband Services in Latin America*. White Paper – Alcatel-Lucent Telecommunications, September 2006.
- [16] L. Khoukhi and S. Cherkaoui. *Intelligent QoS Management for Multimedia Services Support in Wireless Mobile ad hoc Networks*. *Computer Networks*, 54:1692–1706, February 2010.
- [17] I. C. Msadaa, D. Camara, and F. Filali. *Scheduling and CAC in IEEE 802.16 Fixed BWNs: a Comprehensive Survey and Taxonomy*. *IEEE Comm. Surveys & Tutorials*, 12:459–487, Fourth Quarter 2010.
- [18] M.-H. Tsai, J.-T. Sung, and Y.-M. Huang. *Resource Management to Increase Connection Capacity of Real-Time Streaming in Mobile WiMAX*. *IET Communications*, 4:1108–1115, June 2010.
- [19] S. Krile and D. Kuzumilovic. *The Application of Bandwidth Optimization Technique in SLA Negotiation Process*. In *11th International Workshop on*

- Computer-Aided Modeling, Analysis and Design of Communication Links and Networks*, pages 115–121, June 2006.
- [20] S. Krile and D. Perakovic. *Bandwidth Optimization in SLA Negotiation Process*. In *Joint First Workshop on Mobile Future and the Symposium on Trends in Communications*, pages 36–39, June 2006.
- [21] J. Schröder, M. Götzer, and R. Müller. *Resource Management in Next Generation Networks*. *International Journal of Electronics and Communications*, 60:116–124, February 2006.
- [22] P. Bhattarakosol and W. Srisujalertwaja. *A Generic Quality of Service Management Model for Network-Aware Applications*. In *2005 IEEE International Conference on Electro Information Technology*, May 2005.
- [23] H. Guo and G. Kuo. *A Dynamic and Adaptive Bandwidth Management Scheme for QoS Support in Wireless Multimedia Networks*. In *IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, volume 3, pages 2081–2085, June 2005.
- [24] K. Ohata, K. Kobayashi, K. Nakahira, and M. Ueba. *Broadband and Scalable Mobile Satellite Communication System for Future Access Networks*. *Acta Astronautica - Elsevier Science*, 57:239–249, July-October 2005.
- [25] M. Yang, Y. Huang, J. Kim, M. Lee, T. Suda, and M. Daisuke. *An End-to-end QoS Framework with On-demand Bandwidth Reconfiguration*. *Computer Communications - Elsevier Science*, 28:2034–2046, November 2005.
- [26] Y. Shi, F. Ding, and T. Chen. *Multirate Crosstalk Identification in xDSL Systems*. *IEEE Transactions on Communications*, 54:1878–1886, October 2006.
- [27] C. Xu, E. Fallon, Y. Qiao, L. Zhong, and G.-M. Muntean. *Performance Evaluation of Multimedia Content Distribution Over Multi-Homed Wireless Networks*. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 57:204–215, June 2011.
- [28] Y.-M. Hsiao, J.-F. Lee, J.-S. Chen, and Y.-S. Chu. *H.264 Video Transmissions over Wireless Networks: Challenges and Solutions*. *Computer Communications*, 34:1661–1672, April 2011.
- [29] X. Zhao, Y. Dong, H.-T Zhao, Z. Hui, J. Li, and C. Sheng. *A Real-Time Congestion Control Mechanism for Multimedia Transmission over 3G Wireless*

- Networks*. In *12th IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT)*, pages 1236–1239, November 2010.
- [30] O. B. Karimi and M. Fathy. *Adaptive End-to-end QoS for Multimedia over Heterogeneous Wireless Networks*. *Computers & Electrical Engineering*, 36:45–55, January 2010.
- [31] C. Liu, L. Shi, and B. Liu. *Utility-Based Bandwidth Allocation for Triple-Play Services*. In *4th European Conference on Universal Multiservice Networks*, pages 327–336, February 2007.
- [32] M. Baldi. *Triple Play Support for the Next Generation Internet*. In *12th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium*, pages 1–7, November 2006.
- [33] B. Ellett. *Putting Triple Play to the Test*. *IET Communications Engineer*, 4:32–35, April/May 2006.
- [34] G. L. Choudhury. *Analysis of Combined Voice/Data/Video Operation in Cable and DSL access networks: Graceful Degradation under Overload*. *Performance Evaluation*, 52:89–103, 2003.
- [35] D. Migliorini, E. Mingozzi, and C. Vallati. *Performance Evaluation of H.264/SVC Video Streaming over Mobile WiMAX*. *Computer Networks*, 55:3578–3591, October 2011.
- [36] X. Gelabert, O. Sallent, J. Perez-Romero, and R. Agusti. *Performance Evaluation of Radio Access Selection Strategies in Constrained Multi-access/multi-service Wireless Networks*. *Computer Networks*, 55:173–192, January 2011.
- [37] O. Issa, W. Li, and H. Liu. *Performance Evaluation of TV over Broadband Wireless Access Networks*. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 56:201–210, June 2010.
- [38] M. Ma, J. Lu, and C. P. Fu. *Hierarchical Scheduling Framework for QoS Service in WiMAX Point-to-multi-point Networks*. *IET Communications*, 4:1073–1082, June 2010.
- [39] D. Kagklis, S. Androulidakis, G. Patikis, and T. Doukoglou. *A Comparative Performance Evaluation of the ADSL2+ and ADSL Technologies*. In *Internati-*

- onal Transactions on Computer Science and Engineering*, volume 19, pages 1–6, October 2005.
- [40] N. Caouras, M. Freda, F. Monfet, V. S. Aldea, O. Naeem, T. Le-Ngoc, and B. Champagne. *Performance Evaluation Platform for xDSL Deployment in a Complex Multi-Segment Environment*. In *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering – CCECE 2003*, volume 1, pages 61–64, May 2003.
- [41] R. Mehmood, R. Alturki, and S. Zeadally. *Multimedia Applications over Metropolitan Area Networks(MANs)*. *Journal of Network and Computer Applications*, 34:1518–1529, September 2011.
- [42] L. Jiao, V. Pla, and F. Y. Li. *Analysis on Channel Bonding/Aggregation for Multi-channel Cognitive Radio Networks*. In *European Wireless Conference*, pages 468–474, April 2010.
- [43] B. Wang, Z. Ji, K. J. R. Liu, and T. C. Clancy. *Primary-Prioritized Markov Approach for Dynamic Spectrum Allocation*. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8:1854–1865, April 2009.
- [44] C. Tarhini and T. Chahed. *Modeling of Streaming and Elastic Flow Integration in OFDMA-based IEEE 802.16 WiMAX*. *Computer Communications*, 30:3644–3651, December 2007.
- [45] M. Dirani, C. Tarhini, and T. Chahed. *Cross-layer Modeling of Capacity in Wireless Networks: Application to UMTS/HSDPA, IEEE 802.11 WLAN and IEEE 802.16 WiMAX*. *Computer Communications*, 30:3384–3391, November 2007.
- [46] D. Nyato and E. Hossain. *A Queuing-theoretic and Optimization-based model for Radio Resource Management in IEEE 802.16 Broadband Wireless Networks*. *IEEE Transactions on Computers*, 55:1473–1488, November 2006.
- [47] D. Nyato and E. Hossain. *Joint Bandwidth Allocation and Connection Admission Control for Polling Services in IEEE 802.16 Broadband Wireless Networks*. In *IEEE International Conf. Commun.*, volume 12, pages 5540–5545, June 2006.

- [48] Y. Ge and G-S. Kuo. *An Efficient Admission Control Scheme for Adaptive Multimedia Services in IEEE 802.16e Networks*. In *Proc. IEEE 64th Veh. Technol. Conf.*, pages 1–5, September 2006.
- [49] Q. Song and A. Jamalipour. *A Quality of Service Negotiation-based Vertical Handoff Decision Scheme in Heterogeneous Wireless Systems*. *European Journal of Operational Research*, 191:1059–1074, December 2008.
- [50] R. Yu, Z. Sun, and S. Mei. *Packet Scheduling in Broadband Wireless Networks Using Neuro-Dynamic Programming*. In *IEEE 65th Vehicular Technology Conference 2007*, pages 2776–2780, April 2007.
- [51] D. Yagan and C. Tham. *Adaptive QoS Provisioning in Wireless ad hoc Networks: A Semi-MDP Approach*. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2005*, volume 4, pages 2238–2244, March 2005.
- [52] G. H. S. Carvalho, L. V. de Souza, and J. C. W. A. Costa. *Horizons in Computer Science Research*, hardcover e ebook *Radio Resource Management on Fixed Broadband Wireless Networks*. Nova Science Publishers, https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=31585, 2012.
- [53] Loop Qualification Team. *6th Quarterly Report – Q6 (UFA07)*. Technical report, UFPA – Ericsson, May 2010.
- [54] Loop Qualification Team. *5th Quarterly Report – Q5 (UFA07)*. Technical report, UFPA – Ericsson, February 2010.
- [55] L. V. de Souza, B. S. L. Castro, E. L. Oliveira, L. P. Rêgo, J. C. C. Carvalho, J. C. W. A. Costa, and C. R. L. Francês. *Multimedia Transmission on Amazon Region using Wireless Broadband Networks*. In *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting 2009 (BMSB '09)*, pages 1–4, May 2009.
- [56] L. V. de Souza, D. L. Cardoso, M. S. Silva, C. R. L. Francês, J. C. W. A. Costa, and J. R. I Riu. *Multimedia Transmission over Optic, DSL and PLC Systems*. In *3rd IEEE International Workshop on Broadband Convergence Networks (BcN 2008)*, pages 56–59, April 2008.

- [57] L. V. de Souza, D. L. Cardoso, M. S. Silva, M. C. Seruffo, C. R. L. Francês, J. C. W. A. Costa, A. L. S. Castro, G. P. S. Cavalcante, and J. R. I Riu. *Triple Play Service under the Impact of Non Stationary Noise in a DSL System: an Amazon Approach*. In *Broadband Access Communication Technologies Conference – SPIE*, volume 6776, pages 1–8, September 2007.
- [58] L. V. de Souza, I. M. Negrão, R. F. Zampolo, A. L. S. Castro, J. C. W. A. Costa, and J. R. I Riu. *Impulsive Noise Impact on ADSL2+ Systems*. In *XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT 2007*, pages 1–6, September 2007.
- [59] L. V. de Souza, D. L. Cardoso, M. S. Silva, M. C. Seruffo, D. Russillo, J. C. W. A. Costa, C. R. L. Francês, A. L. S. Castro, G. P. S. Cavalcante, and J. R. I Riu. *Impact of Non-Stationary Noise on xDSL Systems: an Experimental Analysis*. In *Noise and Fluctuations in Photonics, Quantum Optics, and Communications Conference – SPIE*, volume 6603, pages 1–9, May 2007.
- [60] L. V. de Souza, G. H. S. de Carvalho, D. L. Cardoso, S. V. de Carvalho, C. R. L. Francês, João C. W. A. Costa, and J. R. I Riu. *MDP-based Resource Allocation for Triple-Play Transmission on xDSL Systems*. In *Broadband Access Communication Technologies Conference – SPIE*, volume 6776, pages 1–9, May 2007.
- [61] Loop Qualification Team. *4th Quarterly Report – Q4 (UFA05)*. Technical report, UFPA – Ericsson, October 2007.
- [62] Loop Qualification Team. *3rd Quarterly Report – Q3 (UFA05)*. Technical report, UFPA – Ericsson, August 2007.
- [63] Loop Qualification Team. *2nd Quarterly Report – Q2 (UFA05)*. Technical report, UFPA – Ericsson, April 2007.
- [64] *Get to Fast, Faster – Accelerate the existing Copper Plant with VDSL 2 Vectoring and Bonding*. Strategic White Paper – Alcatel-Lucent Telecommunications, September 2011.
- [65] S. Lindecke. *DSL Technology and Deployment*. Technical report, DSL Forum, April 2005.

- [66] ITU-T. *G.992.1 – Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Transceivers*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, June 1999.
- [67] T. Starr, J. M. Cioffi, and P. J. Silverman. *Understanding Digital Subscriber Line Technology*. Prentice Hall, 1999.
- [68] P. Golden, H. Dedieu, and K. Jacobsen. *Fundamentals of DSL Technology*. Auerbach Publications, 2006.
- [69] ITU-T. *G.992.3 – Asymmetric Digital Subscriber Line Transceivers 2 (ADSL2)*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, January 2005.
- [70] ITU-T. *G.992.5 – Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Transceivers - Extended Bandwidth ADSL2 (ADSL2+)*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, January 2005.
- [71] ITU-T. *G.993.1 – Very High Speed Digital Subscriber Line Transceivers*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, June 2004.
- [72] ITU-T. *G.993.2 – Very High Speed Digital Subscriber Line Transceivers 2 (VDSL2)*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, February 2006.
- [73] *Leveraging VDSL2 for Mobile Backhaul: Meeting the Long-Term Challenges in the Mobile Broadband Era*. Strategic White Paper – Alcatel-Lucent Telecommunications, 2010.
- [74] P. Cota and T. Pavicic. *New Technologies for Improvement of Characteristics in DSL Access Networks*. In *Proceedings of the 34th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics – MIPRO 2011*, pages 511–516, May 2011.
- [75] ITU-T. *G.998.1 – ATM-based Multi-pair Bonding*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, January 2005.
- [76] ITU-T. *G.998.2 – Ethernet-based Multi-pair Bonding*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, January 2005.
- [77] ITU-T. *G.998.3 – Multi-pair Bonding using Time-Division Inverse Multiplexing*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, January 2005.

- [78] D. Acatauassu, M. Monteiro, F. Muller, and A. Klautau. *Experimental Evaluation of Fourth Generation DSL in Different DSM Scenarios*. In *IEEE Latin American Conference on Communications (LATINCOM) 2011*, pages 1–6, October 2011.
- [79] ITU-T. *G.993.5 – Self-FEXT Cancellation (Vectoring) for use with VDSL2 Transceivers*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, April 2010.
- [80] W. Foubert, C. Neus, L. Van Biesen, and Y. Rolain. *Exploiting the Phantom-Mode Signal in DSL Applications*. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pages 1–7, December 2011.
- [81] G. Keiser. *Optical Fiber Communications*. McGraw-Hill,, 1991.
- [82] J. A. C. Bingham. *ADSL, VDSL, and Multicarrier Modulation*. John Wiley & Sons, 2000.
- [83] T. Starr, M. Sorbara, J. M. Cioffi, and P. J. Silverman. *DSL Advances*. Prentice Hall, 2003.
- [84] W. Y. Chen. *DSL: Simulation Techniques and Standards Development for Digital Subscriber Line Systems*. Macmillan Technical Publishing, 1998.
- [85] ITU-T. *G.992.2 – Splitterless Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Transceivers*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, July 1999.
- [86] J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Muhamed. *Fundamentals of Wimax – Understanding Broadband Wireless Networking*. Pearson Education, 2007.
- [87] IEEE. *Standard 802.16-2009 – IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*. Technical report, IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, May 2009.
- [88] L. Nuaymi. *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access*. John Wiley & Sons, 2007.
- [89] IEEE. *Standard 802.16e-2005 – IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless*

- Access Systems, Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1*. Technical report, IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, February 2006.
- [90] IEEE. *Standard 802.16m-2011 – IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, Amendment 3: Advanced Air Interface*. Technical report, IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, May 2011.
- [91] M. Alasti, B. Neekzad, J. Hui, and R. Vannithamby. *Quality of service in WiMAX and LTE networks*. *IEEE Communications Magazine*, 48:104–111, May 2010.
- [92] R. Jayaparvathy and M. Ivan. *WiMAX: Technologies, Performance Analysis, and QoS*, chapter *Performance Analysis of IEEE 802.16 Fixed Broadband Wireless Access Systems*. CRC Press, 2008.
- [93] Patrick F. Dunn. *Measurement and Data Analysis for Engineering and Science*. McGraw-Hill, 2005.
- [94] G. Bolch, S. Greiner, H. Meer, and K. S. Trivedi. *Queueing Networks and Markov Chains: Modelling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*. John Wiley & Sons, 2nd edn. 2006.
- [95] M. L. Puterman. *Markov Decision Processes – Discrete Stochastic – Dynamic Programming*. Wiley & Sons, 2005.
- [96] H. C. Tijms. *A First Course in Stochastic Models*. Wiley & Sons, 2003.
- [97] O. C. Ibe. *Markov Processes for Stochastic Modeling*. Elsevier, 2009.
- [98] D. J. White. *Markov Decision Processes*. Wiley & Sons, 1993.
- [99] I. Mann, S. McLaughlin, W. Henkel, R. Kirkby, and T. Kessler. *Impulse Generation with Appropriate Amplitude, Length, Inter-arrival, and Spectral Characteristics*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pages 901–912, June 2002.
- [100] OpenH323. *Callgen – OpenH323 Project*. <http://openh323.sourceforge.net/>, Último acesso em: 04/01/2012.

- [101] SIEGE Jeffrey Fulmer. *Joe Dog Software*. <http://www.joedog.org/index/siege-home>, Último acesso em: 04/01/2012.
- [102] VideoLAN Organization. *VLC Media Player*. <http://www.videolan.org/vlc/>, Último acesso em: 04/01/2012.
- [103] ITU-T. *G.996.1 – Test Procedures for Digital Subscriber Line (DSL) Transceivers*. Technical report, ITU – International Telecommunication Union, February 2001.
- [104] Broadband Forum. *TR-048, ADSL Interoperability Test Plan*. Technical report, Broadband Forum, April 2002.
- [105] Governo do Estado do Pará. *TV Cultura*.
- [106] Tobi Oetiker. *MRTG – Multi Router Traffic Grapher*. <http://oss.oetiker.ch/mrtg/>, Último acesso em: 13/01/2012.
- [107] S. Kalyanasundaram, E. K. P. Chong, and N. B. Shroff. *Admission Control Schemes to Provide Class-Level QoS in Multiservice Networks*. *Computer Networks*, 35:307–326, February 2001.
- [108] T. Karagiannis, M. Molle, M. Faloutsos, and A. Broido. *A Nonstationary Poisson View of Internet Traffic*. In *IEEE Infocom – Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 3, pages 1558–1569, March 2004.
- [109] Broadband Forum. *TR-126, Triple play Services Quality of Experience (QoE) Requirements*. Technical report, Broadband Forum, December 2006.
- [110] G. P. Sotiropoulos, D. K. Styliaras, E. A. Kosmatos, C. A. Papagianni, N. D. Tselikas, and I. S. Venieris. *Triple Play Service Simulation and Packet Scheduling Performance Evaluation*. In *International Conference on Digital Telecommunications*, pages 54–59, August 2006.
- [111] B. Li, L. Li, B. Li, K. M. Sivalingam, and X.-R. Cao. *Call Admission Control for Voice/data Integrated Cellular Networks: Performance Analysis and Comparative Study*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22:706–718, May 2004.

- [112] S. Tang and W. Li. *An Adaptive Bandwidth Allocation Scheme with Preemptive Priority for Integrated Voice/Data Mobile Networks*. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5:2874–2886, October 2006.
- [113] N. Ziviani. *Projeto de Algoritmos: com implementações em PASCAL e C*. Cengage Learning, 2009.
- [114] S. V. Carvalho. *Modèles stochastiques appliqués a l'optimisation de la performance et de la sûreté de fonctionnement des systèmes de production*, Ph.D. dissertation, no. 1032. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1991.
- [115] NS-2. *Network Simulator-2*. <http://isi.edu/nsnam/ns/>, Último acesso em: 14/11/2011.
- [116] NS-3. *Network Simulator-3*. <http://www.nsnam.org/>, Último acesso em: 14/11/2011.
- [117] OEFMON. *Open Evaluation Framework for Multimedia Over Networks*. <http://winslab.kaist.ac.kr/oefmon/>, Último acesso em: 14/11/2011.
- [118] W. T. Kasch, J. R. Ward, and J. Andrusenko. *Wireless Network Modeling and Simulation Tools for Designers and Developers*. *IEEE Communications Magazine*, 47:120–127, March 2009.
- [119] F. C. T. Mendes. *Probabilidade para Engenharías*. LTC, 2010.
- [120] H. S. Chang, M. C. Fu, J. Hu, and S. I. Marcus. *Simulation-based Algorithms for Markov Decision Processes*. Springer, 2007.
- [121] Spirent Communications. *AX/4000*. http://www.spirent.com/Solutions-Directory/AX_4000, Último acesso em: 18/02/2012.
- [122] Spirent Communications. *DLS 5500*. <http://www.spirent.com/Solutions-Directory/DLS>, Último acesso em: 18/02/2012.
- [123] RADCOM. *Analísador de Protocolos Performer Lite*. <http://www.radcom.com/protocol-analyzer-performer>, Último acesso em: 18/02/2012.
- [124] Spirent Communications. *DLS 410E3*. <http://www.spirent.com/Solutions-Directory/DLS>, Último acesso em: 18/02/2012.

Apêndice A

Conceitos Básicos de Probabilidade e Estatística

Este apêndice têm por objetivo ser uma revisão breve de alguns conceitos de probabilidade e estatística abordados nesta Tese. Tais conceitos podem ser estudados com maior profundidade em [94] [95] [119].

A.1 Processos Estocásticos e Markovianos

Um processo estocástico é definido como uma família de variáveis aleatórias $\{\mathbf{X}_t : t \in \mathcal{T}\}$ onde cada variável aleatória \mathbf{X}_t é indexada por um parâmetro $t \in \mathcal{T}$, o qual é usualmente chamado de parâmetro de tempo se

$$\mathcal{T} \subseteq \mathbb{R}_+[0, \infty).$$

O conjunto de todos os valores possíveis de \mathbf{X}_t (para cada $t \in \mathcal{T}$) é conhecido como o espaço de estados \mathcal{S} de um processo estocástico.

Um processo estocástico $\{\mathbf{X}_t : t \in \mathcal{T}\}$ constitui um processo Markoviano se para todo $\mathbf{0} = t_0 < t_1 < \dots < t_n < t_{n+1}$ e para todo $s_i \in \mathcal{S}$ a CDF (cumulative distribution function – função distribuição cumulativa) condicional de $\mathbf{X}_{t_{n+1}}$ depende somente do valor anterior \mathbf{X}_{t_n} e não dos valores $\mathbf{X}_{t_0}, \mathbf{X}_{t_1}, \dots, \mathbf{X}_{t_{n-1}}$ [95] [94]:

$$\begin{aligned} P(\mathbf{X}_{t_{n+1}} \leq s_{n+1} \mid \mathbf{X}_{t_n} = s_n, \mathbf{X}_{t_{n-1}} = s_{n-1}, \dots, \mathbf{X}_{t_0} = s_0) &= \\ &= P(\mathbf{X}_{t_{n+1}} \leq s_{n+1} \mid \mathbf{X}_{t_n} = s_n). \end{aligned} \tag{A.1}$$

A.2 Processo Markoviano Homogêneo no Tempo

Fazendo $t_0 = \mathbf{0}$ e sem perda de generalidade, um processo de Markov é chamado homogêneo no tempo se a CDF condicional de $\mathbf{X}_{t_{n+1}}$ não depende do tempo de

observação, isto é, a CDF é invariante com respeito ao tempo t_n [94]:

$$P(X_{t_{n+1}} \leq s_{n+1} \mid X_{t_n} = s_n) = P(X_{t_{n+1}-t_n} \leq s_{n+1} \mid X_0 = s_n). \quad (\text{A.2})$$

A.3 Teorema da Probabilidade Total

Diz-se que os eventos B_1, B_2, \dots, B_n representam uma partição do espaço amostral S quando [119]:

- Condição 1:

$$B_i \cap B_j = \emptyset,$$

para todo $i \neq j$;

- Condição 2:

$$\bigcup_{i=1}^n B_i = S.$$

Considere agora um evento A qualquer referente ao espaço amostral S , onde B_1, B_2, \dots, B_n representam uma partição deste espaço amostral S . Pode-se escrever: $A = (A \cap B_1) \cup (A \cap B_2) \cup \dots \cup (A \cap B_n)$. Alguns dos eventos $A \cap B_j$, para $j = 1, 2, \dots, n$ poderão ser vazios, mas isso não invalida essa decomposição do evento A .

Como todos os eventos $(A \cap B_1), (A \cap B_2), \dots, (A \cap B_n)$ são dois a dois mutuamente excludentes, então tem-se:

$$P(A) = P(A \cap B_1) + P(A \cap B_2) + \dots + P(A \cap B_n).$$

Contudo, cada termo $P(A \cap B_j)$ pode ser expresso na forma $P(A \mid B_j)P(B_j)$ e, assim, obtem-se o **Teorema da Probabilidade Total** [119]:

$$P(A) = P(A \mid B_1)P(B_1) + P(A \mid B_2)P(B_2) + \dots + P(A \mid B_n)P(B_n) \quad (\text{A.3})$$

Apêndice B

Cálculo de Políticas Ótimas

Este apêndice apresenta os conceitos fundamentais relacionados ao cálculo de políticas ótimas utilizando o algoritmo de iteração de valores. Um estudo mais detalhado sobre este assunto pode ser encontrado em [95] [96] [120].

B.1 Algoritmo de Iteração de Valores

Entre os algoritmos existentes, são dois os mais conhecidos para determinação de políticas ótimas em problemas de horizontes infinitos: iteração de políticas e iteração de valores [120]. Uma vez que o ModEsto [114], usado nesta Tese, utiliza o iteração de valores, este algoritmo será o único a ser abordado com maior grau de detalhes.

O algoritmo de iteração de valores (AIV), também conhecido como algoritmo de aproximações sucessivas, pode em alguns casos necessitar de um número muito grande de iterações mesmo quando o número de espaços e estados são finitos [120]. Apesar disto, é a melhor solução computacional para resolver problemas de Decisão de Markov de larga escala [96].

O AIV é eficiente para problemas de grande porte, ou seja, onde há um grande espaço de estados \mathcal{S} envolvidos. Basicamente, calcula-se recursivamente o valor da função V_n aproximando o custo médio mínimo por unidade de tempo.

Considere que custo mínimo por unidade de tempo seja independente do estado inicial. Fazendo g^* o custo médio mínimo por unidade de tempo, tem-se que o AIV calcula recursivamente, para $n = 1, 2, 3, \dots$, o valor da função $V_n(i)$ dada por [96]

$$V_n(i) = \min_{a \in \mathcal{A}(i)} \left(c_i(a) + \sum_{j \in \mathcal{S}} p_{ij}(a) V_{n-1}(j) \right), \quad (\text{B.1})$$

onde: $i \in \mathcal{S}$; $\mathcal{A}(i)$ representa o conjunto de ações ou decisões existentes no estado i ; e $c_i(a)$ é o custo da ação a escolhida em um estado i .

Assim, o AIV se inicia escolhendo um valor arbitrário $V_0(i)$, $i \in S$. A quantidade $V_n(i)$ pode ser interpretada como o custo total mínimo esperado após n períodos de tempo desde quando o estado atual era i e um custo terminal de $V_0(j)$ é incorrido quando o sistema chega a um estado j .

É esperado que a diferença $V_n i - V_{n-1}(i)$ se aproxime cada vez mais de g^* e que a política estacionária cuja as ações minimizem o lado direito da Equação B.1 para todo i terá um custo muito próximo do custo médio mínimo.

Desta forma, pode-se resumir o AIV em cinco passos fundamentais:

- Passo 0 (inicialização): Escolha $V_0(i)$, $i \in S$, com $0 \leq V_0(i) \leq \min_a c_i(a)$.
Faça $n := 1$;
- Passo 1: Para cada estado $i \in S$, calcule o valor da Equação B.1. Faça $R(n)$ a política estacionária, tal que a ação $a = R_i(n)$ minimize o lado direito da Equação B.1 para estado i ;
- Passo 2: Calcule os limites dados pelas equações abaixo

$$m_n = \min_{i \in S} (V_n(i) - V_{n-1}(i)), \quad (\text{B.2})$$

$$M_n = \max_{i \in S} (V_n(i) - V_{n-1}(i)); \quad (\text{B.3})$$

- Passo 3: Se

$$0 \leq M_n - m_n \leq \epsilon m_n; \quad (\text{B.4})$$

com $\epsilon > 0$ sendo a precisão pré-definida (por exemplo, $\epsilon = 10^{-3}$), pare o algoritmo e assuma a política $R(n)$;

- Passo 4: $n := n + 1$ e repita o passo 1.

Apêndice C

Equipamentos Utilizados nas Campanhas de Medições

Este apêndice apresenta os detalhes operacionais a respeito dos principais utilizados nas campanhas de medições contidas nesta Tese. Maiores informações sobre estes equipamentos podem ser encontrados nos *sites* dos respectivos fabricantes dos equipamentos.

C.1 Gerador e Analisador de Tráfego AX/4000

O gerador e analisador de tráfego AX/4000 é um sistema de teste para aplicações banda larga desenvolvido pela Spirent Communications [121].

Este equipamento permite que testes de QoS nas camadas 2 (rede – IP) e 3 (transporte – TCP e UDP) de sistemas TCP/IP sejam realizados. Desta forma, é possível verificar a capacidade da rede (ou de um elemento da rede) em atender a níveis de qualidade previamente estipulados.

Através do equipamento AX/4000 é possível medir o desempenho de vários tipos de redes de acesso, pois o equipamento possui saídas elétricas (RJ-45) e ópticas. Adicionalmente, este equipamento possibilita assim a geração simultânea de diferentes tipos de tráfego, o que permite a geração de tráfego *triple play*, ou seja, tráfego composto de vídeo, dados e voz.

Os parâmetros de QoS que podem ser objeto de análise pelo AX/4000 são: latência (atraso na transferência de dados), vazão de dados (*throughput*), sequência e erros de bits.

C.2 Gerador de Ruído DLS 5500

O gerador de ruído DLS 5500 da Spirent Communications permite que ruídos padronizados sejam aplicados em sistemas de testes de ambientes DSL [122]. Este tem equipamento foi projetado para a realização de testes em DSLAMs e modems e possibilita a geração de ruídos de crosstalk, ruídos brancos e RFI (Radio Frequency Ingress - ingresso de rádio frequência).

O DLS 5500 é baseado em um gerador de forma de onda de 4 canais. Tal gerador utiliza um conversor digital-analógico de 14 bits e possibilita que ruídos definidos pelo ITU-T, ANSI, ETSI e Broadband Forum sejam utilizados.

A faixa de frequência dos sinais gerados por este equipamento vai de 4 KHz até 30 MHz, possibilitando que as tecnologias atuais de sistemas DSL (ADSL2+, VDSL e VDSL2) sejam plenamente atendidas.

C.3 Analizador de Protocolo Performer Lite

O analisador de protocolo Performer Lite da Radcom é uma plataforma portátil para análise da sinalização em diferentes tipos de redes [123].

Possui suporte para análise das sinalizações SIP (Session Initiation Protocol - protocolo de inicialização de sessão) e H.323, além de suporte a análise de qualidade de voz via MOS, PAMS (Perceptual Analysis/Measurement System - sistema de medição/análise de percepção) e PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality - avaliação da percepção da qualidade de voz).

O analisador de protocolo Performer Lite possui interfaces Ethernet de 10/100/1000 Mbps e STM-1.

C.4 Simulador de Linha DLS 410E3

O simulador de linha DLS 410E3 é produzido pela Spirent Communications [124] reproduz cabos telefônicos, segundo o padrão Europeu, para sistemas ADSL2 e ADSL2+.

A simulação dos cabos é feita através da reprodução das características elétricas AC e DC dos mesmos, utilizando para isso circuitos elétricos RLC. Desta forma, as características de atenuação, impedância e velocidade de propagação encontradas em um cabo real são adequadamente simuladas.

Os enlaces que podem ser simulados possuem seção de 0,4 mm e 0,5 mm e a faixa

de operação do simulador vai de 0 a 4,5 MHz.