

MOV
621.3
AGG 3^a
TES/ME

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO DAS
CATEGORIAS DE SERVIÇO ABR E GFR COM APLICAÇÕES
TCP/IP SOBRE UMA REDE DE ACESSO BASEADA EM ATM
SOBRE ADSL

CLIDENOR FERREIRA DE ARAÚJO FILHO

NOVEMBRO

2001

SISBI/UFU



1000203635

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO DAS
CATEGORIAS DE SERVIÇO ABR E GFR COM APLICAÇÕES
TCP/IP SOBRE UMA REDE DE ACESSO BASEADA EM ATM
SOBRE ADSL

Dissertação apresentada por Clidenor Ferreira de Araújo Filho à
Universidade Federal de Uberlândia para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica aprovada em 28/11/01 pela banca examinadora:

Professor Paulo Roberto Guardieiro, Dr. (UFU) – Orientador

Professor Walter Godoy Júnior, Dr. (CEFET - PR)

Professor Jamil Salem Barbar, Dr. (UFU)

**ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO DAS
CATEGORIAS DE SERVIÇO ABR E GFR COM APLICAÇÕES
TCP/IP SOBRE UMA REDE DE ACESSO BASEADA EM ATM
SOBRE ADSL**

CLIDENOR FERREIRA DE ARAÚJO FILHO

Dissertação apresentada por Clidenor Ferreira de Araújo Filho à
Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Paulo Roberto Guardieiro

Orientador

Prof. Dr. Luis Carlos de Freitas

Coordenador do Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Ao meus queridos pais, Clidenor e Marlene, pelo apoio incessante, pela compreensão, paciência e amor, demonstrados em todos os momentos de minha vida.

“Eu, a Sabedoria, sou vizinha da perspicácia e descubro o sentido dos designios. O temor do Senhor é ódio do mal. Detesto o orgulho e a soberba, a má conduta e a boca perversa. Possuo o bom conselho e a habilidade, são minhas a inteligência e a força. Ditoso o homem que me escuta, velando junto a meu portal cada dia, guardando os umbrais de minha porta! Pois quem me encontra, encontra a vida e obtém o favor do Senhor.” (Prov. 8, 12-14. 34-35a).

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade e pela constante iluminação, sem as quais seria impossível a realização deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pelos recursos oferecidos para a minha formação e para a execução deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto Guardieiro por ter acreditado na realização deste estudo, dedicando-me toda a sua compreensão, o seu apoio e sobretudo a sua inestimável orientação.

À CAPES Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela ajuda financeira recebida no decurso do meu trabalho de pós-graduação.

Aos colegas dos diversos grupos de pesquisa da pós-graduação, pelo apoio e incentivo que sempre me dispensaram.

Aos amigos do Laboratório de Redes de Computadores, Haroldo Zattar, Ruy de Oliveira, Johann Max, Eliane Aureliana, Leandra Mendes, Solange Silva, Marco Aurélio e Érica, pelo companheirismo, paciência e amizade a mim dedicados.

À amiga Daniela Cunha pelo exemplo de dedicação, eficiência e bondade, demonstrado através de sua constante disposição em colaborar com a realização deste trabalho.

Aos técnicos administrativos Marcília, Joana e Gonçalo pela presteza e amizade com que sempre me atenderam.

Aos meus familiares e às pessoas cujo afeto por mim sempre contribuíram para o meu bom desempenho.

RESUMO

ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO DAS CATEGORIAS DE SERVIÇO ABR E GFR COM APLICAÇÕES TCP/IP SOBRE UMA REDE DE ACESSO BASEADA EM ATM SOBRE ADSL

Este trabalho apresenta um estudo comparativo de desempenho do controle de tráfego ATM, realizado pelas categorias de serviço ABR e GFR, na minimização das variações da banda passante disponível no enlace ADSL, que são provocadas por alterações nas condições operacionais e propriedades físicas do referido enlace durante sua utilização. Este estudo, que foi realizado por meio de modelagem e simulação, considerou as aplicações da arquitetura TCP/IP. O controle realizado pela categoria ABR utilizou-se dos algoritmos ERICA+ e EPRCA para o controle da ER (*Explicit Rate*), visando combater problemas como o descarte de células, ocasionado por fatores como o atraso de enfileiramento. Já a implementação da categoria de serviço GFR foi realizada através da técnica Per-VC-WRR, a qual é uma combinação do mecanismo de gerenciamento de *buffers* FBA e do mecanismo de escalonamento WRR. Considerou-se ainda a implementação da categoria GFR utilizando-se um mecanismo de controle ABR. Como resultado do emprego do controle de tráfego ATM observou-se que a categoria de serviço ABR, mais especificamente a técnica ABR-ER que utiliza o algoritmo ERICA+, apresentou o melhor desempenho em termos gerais se comparada com as demais técnicas empregadas, considerando-se os níveis de vazão do TCP e justiça entre os VCs, que foram alcançados.

Palavras-chave: ADSL, ATM, TCP/IP, variações de banda passante, controle de tráfego.

ABSTRACT

COMPARATIVE PERFORMANCE STUDY OF THE ABR AND GFR SERVICE CATEGORIES WITH TCP/IP APPLICATIONS IN AN ACCESS NETWORK BASED ON ATM OVER ADSL

This work presents a comparative performance study of the ATM traffic control, realized using the ABR and GFR service categories, in the decreasing of the ADSL bandwidth variations, which are provoked by alterations in the operational conditions and physical properties of the related ADSL link during its use. Such study, which was realized by means of modeling and simulation, considered the applications of the TCP/IP architecture. The control done by the ABR category used the ERICA and EPRCA algorithms for the ER (Explicit Rate) control, trying to extinguish problems like the discarding of cells, caused by factors like queuing delay. On the other hand, the GFR service category implementation was realized by using the Per-VC-WRR technique, which is a combination of the FBA buffer management mechanism and the WRR scheduling mechanism. The implementation of the GFR category using an ABR control mechanism, was still considered. As result of the employment of the ATM traffic control, the ABR service category, more specifically the ABR-ER technique that uses the ERICA+ algorithm, presented the best performance in general terms if compared with the others techniques used, considering the levels of TCP throughput and fairness between the VCs, that had been reached.

Key words: ADSL, ATM, TCP/IP, ADSL bandwidth, ATM traffic control.

**ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO DAS
CATEGORIAS DE SERVIÇO ABR E GFR COM APLICAÇÕES
TCP/IP SOBRE UMA REDE DE ACESSO BASEADA EM ATM
SOBRE ADSL**

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	ATM SOBRE ADSL	8
2.1.	Introdução	8
2.2.	Redes ATM	9
2.2.1.	Modelo de Camadas ATM	11
2.2.2.	Categorias de Serviço	13
2.3.	Redes de Acesso	18
2.3.1.	Tecnologias de Acesso	19
2.3.2.	Tecnologia ADSL	22
2.4.	O problema da Variação de Banda Passante no Enlace ADSL e suas Causas	29
2.5.	Transporte de Células ATM sobre uma rede de acesso ADSL	31
2.5.1.	Modelo de Referência	31
2.5.2.	DSLAM	35
2.6.	Conclusões	36

3.	UMA PROPOSTA PARA A MINIMIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DE BANDA PASSANTE DISPONÍVEL PARA APLICAÇÕES TCP/IP	38
3.1.	Introdução	38
3.2.	Protocolo TCP	39
3.2.1.	Controle de fluxo TCP	40
3.2.1.1.	Estratégia de Retransmissão	42
3.2.1.2.	Retransmissão Adaptativa	43
3.2.1.3.	Ambiguidade de Confirmação	44
3.2.1.4.	Alta Variância no Retardo de Transmissão	46
3.2.1.5.	Reação ao Congestionamento	47
3.2.1.6.	Algoritmos <i>Fast Retransmit e Fast Recovery</i>	51
3.3.	Controle de Tráfego ATM	52
3.3.1.	Controle realizado pela Categoria de Serviço ABR	52
3.3.1.1.	Técnica de Fontes e Destinos Virtuais (VS/VD)	53
3.3.1.2.	Técnica <i>ABR-Binary</i>	54
3.3.1.3.	Técnica <i>ABR-ER</i>	55
3.3.2.	Controle realizado pela Categoria de Serviço GFR	66
3.3.2.1.	Mecanismos para Implementação da Categoria GFR	67
3.3.2.2.	Mecanismo EPD	69
3.3.2.3.	Implementação do Mecanismo <i>Selective Drop</i> utilizando <i>Per-VC-Accounting</i>	70
3.3.2.4.	Mecanismo FBA	71

3.3.2.5.	Técnica Per-VC-WRR	72
3.4.	Uma Proposta para a Minimização da Variação de Banda Passante Disponível para Aplicações TCP/IP sobre uma Rede de Acesso Baseada em ATM sobre ADSL	74
3.5.	Conclusões	77
4.	ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO DAS CATEGORIAS DE SERVIÇO ABR E GFR NA MINIMIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DE BANDA PASSANTE NO ENLACE ADSL	78
4.1.	Introdução	78
4.2.	Modelagem do Sistema	80
4.3.	Solução do Modelo	82
4.4.	Apresentação dos Resultados Obtidos nas Simulações	85
4.4.1.	Desempenho Obtido para o fluxo <i>Upstream</i> (Cenário 1)	86
4.4.2.	Desempenho Obtido para o fluxo <i>Downstream</i> (Cenário 2)	101
4.5.	Comparação entre as técnicas de controle ABR- <i>BINARY</i> , ABR-ER (ERICA+ E EPRCA), GFR (PER-VC-WRR) e GFR utilizando um Mecanismo de Controle ABR	113
4.6.	Conclusões	115
5.	CONCLUSÕES GERAIS	116
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
7.	ANEXOS	129

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 Estrutura de uma célula ATM
- Figura 2.2 Modelo de Camadas
- Figura 2.3 Tecnologias de Acesso
- Figura 2.4 DMT (*Discrete Multitone*)
- Figura 2.5 FDM (*Frequency Division Multiplexing*)
- Figura 2.6 Superframe ADSL
- Figura 2.7 Fluxos de Dados
- Figura 2.8 *Crosstalk* NEXT e FEXT
- Figura 2.9 Modelo de Referência ADSL
- Figura 2.10 Pilha de Protocolos
- Figura 2.11 Fragmentação dos Dados
- Figura 2.12 DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*)
- Figura 3.1 Mecanismo de Alocação de Créditos TCP
- Figura 3.2 Mecanismo de Alocação de Créditos do Ponto de Vista do Transmissor e do Receptor
- Figura 3.3 *Slow Start* e *Congestion Avoidance*
- Figura 3.4 *Loop* de Controle ABR
- Figura 3.5 Técnica VS/VD
- Figura 3.6 Estratégia de Implementação do Mecanismo EPD
- Figura 3.7 Mecanismo *Selective Drop*
- Figura 3.8 Técnica Per-VC-WRR
- Figura 3.9 Controle ABR no Enlace ADSL
- Figura 3.10 Implementação GFR empregando um mecanismo de Controle ABR

- Figura 4.1 Cenário de Rede
- Figura 4.2 Vazão do TCP para o Fluxo *Upstream*
- Figura 4.3 Variações da ACR para o Fluxo *Upstream*
- Figura 4.4 Nível de Ocupação dos *Buffers* para o Fluxo *Upstream*
- Figura 4.5 Taxa Média de Utilização para o Fluxo *Upstream*
- Figura 4.6 Fator de Carga para o Fluxo *Upstream*
- Figura 4.7 CWND para o Fluxo *Upstream*
- Figura 4.8 Vazão do TCP em função do Número de VCs Ativos para $T_{upstream} = 1s$
- Figura 4.9 Nível de Justiça entre os VCs para $T_{upstream} = 1s$
- Figura 4.10 Nível de ocupação dos *Buffers* para o Fluxo de Dados *Upstream*
- Figura 4.11 Vazão do TCP para o Fluxo *Downstream*
- Figura 4.12 Variação da ACR para o Fluxo *Downstream*
- Figura 4.13 Nível de Ocupação dos *Buffers* para o Fluxo *Downstream*
- Figura 4.14 Fator de Carga para o Fluxo *Downstream*
- Figura 4.15 Taxa Média de Utilização para o Fluxo *Downstream*
- Figura 4.16 CWND para o Fluxo *Downstream* c/ $T_{downstream} = 0,1s$
- Figura 4.17 Vazão do TCP para Diferentes Tamanhos de *Buffers* para o Fluxo *Downstream*
- Figura 4.18 Vazão do TCP em função do Número de VCs Ativos para $T_{downstream} = 1s$
- Figura 4.19 Nível de Justiça entre os VCs para $T_{downstream} = 1s$
- Figura 4.20 Nível de ocupação dos *Buffers* para o Fluxo de Dados *Downstream*

LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1 Aplicações Típicas ADSL
- Tabela 2.2 Comparação entre as principais redes de acesso e o ADSL
- Tabela 3.1 Atualização da ACR

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AAL	<i>ATM Adaptation Layer</i>
ABR	<i>Available Bit Rate</i>
ABR-ER	<i>Available Bit Rate – Explicit Rate</i>
ACK	<i>Acknowledgement</i>
ACR	<i>Allowed Cell Rate</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
ATU	<i>ADSL Transmission Unit</i>
ATU-C	<i>ADSL Transmission Unit at the Customer End</i>
ATU-R	<i>ADSL Transmission Unit at the Remote End</i>
AV	<i>Average Factor</i>
BRM-Cell	<i>Backward Resource Management Cell</i>
CAC	<i>Connection Admission Control</i>
CAP	<i>Carrierless Amplitude Phase Modulation</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CCR	<i>Cell Current Rate</i>
CDV _{pp}	<i>Peak-to-Peak Cell Delay Variation</i>
CDVT	<i>Cell Delay Variation Tolerance</i>
CI	<i>Congestion Indication</i>
CLP	<i>Cell Loss Priority</i>
CLR	<i>Cell Loss Rate</i>
CPCS-PDU	<i>Common Part Convergency Sublayer-Protocol Data Unit</i>

CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CS	<i>Convergence Sublayer</i>
CTD _{max}	<i>Maximum Cell Transfer Delay</i>
CWND	<i>Congestion Window</i>
DMT	<i>Discrete Multitone</i>
DPF	<i>Down Pressure Factor</i>
DQT	<i>Very Congest Queue Threshold</i>
DSLAM	<i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer</i>
EFCI	<i>Explicit Forward Congestion Indication</i>
EPD	<i>Early Packet Discard</i>
EPRCA	<i>Enhanced Proportional Rate Control Algorithm</i>
ER	<i>Explicit Rate</i>
ERF	<i>Explicit Reduction Factor</i>
ERICA	<i>Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance</i>
FBA	<i>Fair Buffer Allocation</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FEXT	<i>Far End Crosstalk</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FRM-Cell	<i>Forward Resource Management Cell</i>
FTTx	<i>Fiber To The</i>
FTTC	<i>Fiber To The Curb</i>
FTTH	<i>Fiber To The Home</i>
GCRA	<i>Generic Cell Rate Algorithm</i>
GFR	<i>Guaranteed Frame Rate</i>

HBO	<i>High Buffer Occupancy</i>
HDSL	<i>High Bit Rate Digital Subscriber Line</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
HFC	<i>Hybrid Fiber Coax</i>
ICR	<i>Initial Cell Rate</i>
IDSL	<i>Integrated Services Digital Network DSL</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LAN	<i>Local Area Networks</i>
LBO	<i>Low Buffer Occupancy</i>
LMDS	<i>Local Multipoint Distribution System</i>
Low-T	<i>Low Threshold</i>
MACR	<i>Mean Allowed Cell Rate</i>
MBO	<i>Max Buffer Occupancy</i>
MBS	<i>Maximum Burst Size</i>
MCR	<i>Minimum Cell Rate</i>
MFS	<i>Maximum Frame Size</i>
MMDS	<i>Multichannel Multipoint Distribution System</i>
MRF	<i>Major Reduction Factor</i>
MSS	<i>Maximum Segment Size</i>
NEXT	<i>Near End Crosstalk</i>
NNI	<i>Network-Network Interface</i>
nrt-VBR	<i>Non Real Time Variable Bit Rate</i>
OAM	<i>Operation and Maintenance</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
PCR	<i>Peak Cell Rate</i>

PM	<i>Physical Medium Sublayer</i>
POTS	<i>Plain Old Telephone Service</i>
PVC	<i>Permanent Virtual Connections</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QDLF	<i>Queue Drain Limit Factor</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RDF	<i>Rate Decrease Factor</i>
RIF	<i>Rate Increase Factor</i>
RM-Cell	<i>Resource Management Cell</i>
RR	<i>Round Robin</i>
RTO	<i>Retransmission TimeOut</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
rt-VBR	<i>Real Time Variable Bit Rate</i>
SAR	<i>Segmentation and Reassembly Sublayer</i>
SAR-PDU	<i>Segmentation and Reassembly Sublayer-Protocol Data Unit</i>
SCR	<i>Sustainable Cell Rate</i>
SDSL	<i>Single Line Digital Subscriber Line</i>
SSTHRESH	<i>Slow Start Threshold Size</i>
SVC	<i>Switched Virtual Connections</i>
TC	<i>Transmission Convergence Sublayer</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TE	<i>Terminal Equipment</i>
UBR	<i>Unspecified Bit Rate</i>
UNI	<i>User-Network Interface</i>
VC	<i>Virtual Channel</i>

VCI	<i>Virtual Channel Identifier</i>
VCS	<i>VC Separator</i>
VD	<i>Virtual Destination</i>
VDSL	<i>Very High Bit Rate Digital Subscriber Line</i>
VPI	<i>Virtual Path Identifier</i>
VS	<i>Virtual Source</i>
WAN	<i>Wide Area Networks</i>
WRR	<i>Weighted Round Robin</i>
xDSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
xMDS	<i>Multipoint Distribution System</i>

ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO DAS CATEGORIAS DE SERVIÇO ABR E GFR COM APLICAÇÕES TCP/IP SOBRE UMA REDE DE ACESSO BASEADA EM ATM SOBRE ADSL

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por novos tipos de aplicações, sejam elas profissionais ou domésticas, sobretudo aplicações em banda larga (distribuição de vídeo, videoconferência, educação à distância, etc), as quais requerem uma banda passante relativamente grande e garantia de qualidade de serviço, motivou o desenvolvimento da tecnologia ATM sobre ADSL. Esta tecnologia alia a flexibilidade na alocação de bandas passantes e o suporte à qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) típicos do ATM ao serviço de acesso em banda larga propiciado pelo ADSL, além de não requerer grandes investimentos para atender esta nova demanda [1, 2].

A garantia de QoS oferecida pela tecnologia ATM considera uma grande variedade de parâmetros, os quais são estabelecidos em função de determinadas categorias de serviço. Tais categorias são definidas considerando-se aspectos como o transporte em tempo real ou não,

tráfegos em surtos ou contínuos, além de limites para o tempo de resposta da rede em função do tipo de aplicação sendo transportada [3].

A utilização do serviço de acesso em banda larga realizado pelo ADSL vem de encontro ao crescimento da utilização de serviços que incorporam aplicações em banda larga, uma vez que é necessário a construção de uma infra-estrutura de acesso que acomode estes serviços. Em linhas gerais, uma infra-estrutura de acesso corresponde a uma rede que atribui capacidade de acesso a diversos tipos de terminais de usuários, permitindo-lhes acessarem os vários provedores (nós de serviço específico) localizados nos extremos das redes [4].

Entre as principais tecnologias de redes de acesso em uso, destacam-se a família xDSL, as tecnologias FTTx (*Fiber To The Home* ou *Fiber To The Curb*), a tecnologia HFC (*Hybrid Fiber Coax*), os sistemas via satélite e vários tipos de sistemas de distribuição em rádio frequência (xMDS) (*Multichannel Multipoint Distribution System* ou *Local Multipoint Distribution System*) [4].

O ADSL é uma tecnologia posicionada no nível físico que permite o acesso a diversos tipos de rede, sendo caracterizada pela transmissão assimétrica das informações. Sua capacidade de transmissão está ligada a fatores como a qualidade da linha de assinante e a distância da transmissão. Tal capacidade está ainda relacionada à direção do fluxo de informações, considerando-se a natureza assimétrica do acesso oferecido pelo ADSL [5] - [9].

Um dos problemas relevantes em se tratando do desempenho de uma rede de acesso baseada no ADSL é a variação da banda passante disponível nos enlaces resultantes. Nestes enlaces, a banda passante está sujeita a variações no decorrer do tempo, ocasionadas sobretudo pelas alterações das condições operacionais e propriedades físicas do meio de transmissão, tais como, variações de temperatura e interferências eletromagnéticas (*crosstalk*, ruído impulsivo, etc) [5, 6, 10].

Neste contexto, considerando-se as variações de banda passante no enlace ADSL e tendo em vista a já mencionada necessidade atual de garantir às aplicações que requerem um nível mínimo de QoS, propõe-se a utilização do controle de tráfego ATM, realizado pelas categorias ABR e GFR, na minimização dos efeitos destas variações.

O controle de tráfego ATM, realizado pelas categorias de serviço ABR (*Available Bit Rate*) e GFR (*Guaranteed Frame Rate*), foi criado com o objetivo de permitir um determinado nível de garantia aos tráfegos que apresentem comportamento surtivo e imprevisível [11, 12]. Este comportamento provoca em muitos casos, uma inadequada utilização da banda passante disponível na rede, o que pode causar aumento nos atrasos de transferência e a sobrecarga de *buffers*, resultando na perda de dados.

ABR é uma categoria de serviço que controla a taxa de emissão de células de cada VC (*Virtual Channel*) com base em informações a respeito das condições da rede. Tais informações são transportadas através de células especiais denominadas células RM (*Resource Management*), as quais são intercaladas pelo TE (*Terminal Equipment*) fonte entre as células de dados. No TE origem, a taxa de transmissão permitida, ou ACR (*Allowed Cell Rate*) é atualizada utilizando-se as informações contidas nas células RM.

Para o controle ABR, dois tipos de *switches* ATM estão sendo utilizados, o *binary-mode* e o *ER-mode*. A técnica de controle utilizada pelo *switch binary-mode* é denominada *ABR-Binary* e a técnica utilizada pelo *switch ER-mode* é denominada *ABR-ER*.

A técnica *ABR-Binary* utiliza as informações a respeito do estado de congestionamento da rede contidas no bit CI (*Congestion Indication*) das células RM para a implementação de um protocolo que adaptativamente reduza a ACR e, conseqüentemente, a taxa de emissão de células durante um congestionamento [3].

Na técnica *ABR-ER*, os *switches* ATM indicam de forma explícita a taxa na qual os TEs origem podem transmitir as células de informação (*ER - Explicit Rate*). Para tanto,

diversos algoritmos de controle podem ser utilizados, tais como, os algoritmos ERICA (*Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance*) e EPRCA (*Enhanced Proportional Rate Control Algorithm*). A adoção destes algoritmos permite o combate a problemas relacionados com o descarte de células, bem como ao atraso de enfileiramento nos *buffers* [13] - [16].

O algoritmo ERICA foi criado com a preocupação de garantir uma justa e eficiente alocação de banda passante disponível (*Fair_Share*) às diversas fontes de tráfego controladas pelo ABR [16]. Como um algoritmo de controle ele requer o constante monitoramento dos recursos disponíveis na rede (banda passante e espaço nos *buffers*), bem como da demanda por estes recursos. Tendo em vista a predominância do enfileiramento de saída nos *switches* ATM, o algoritmo ERICA é aplicado a cada uma de suas portas de saída.

Para alcançar seus objetivos, este algoritmo depende do estabelecimento de um comprimento limite superior para o tamanho das filas, o qual será utilizado como referência para a sua atuação no gerenciamento do nível de utilização do enlace. Tal redução permitirá a manutenção de uma adequada taxa de utilização do meio quando as filas forem pequenas e, também uma rápida redução destas filas, quando elas aumentarem de tamanho.

A utilização do comprimento das filas nos *buffers* dos *switches* para a redução do nível de utilização do enlace é conhecida como algoritmo ERICA+ [16].

O mecanismo de controle do algoritmo EPRCA é baseado no modelo de controle da taxa de transmissão denominado *positive feedback* [15]. Neste modelo somente é permitido à fonte de tráfego aumentar a taxa de emissão de células quando há uma indicação explícita de que isto é possível. Caso não haja esta indicação, a taxa de emissão é decrementada continuamente durante a transmissão até alcançar a ACR, sendo tal indicação realizada através das células RM.

De forma mais específica, o algoritmo EPRCA utiliza uma variável para manter um resumo da taxa de transmissão de todos os VCs ativos em cada enlace. Esta variável,

denominada MACR (*Mean Allowed Cell Rate*), é utilizada como valor de referência para o controle realizado por este algoritmo [13] - [15].

Já a categoria de serviço GFR, a qual destina-se a aplicações que não sejam em tempo real e a usuários que não podem especificar todos os parâmetros que são necessários em uma solicitação por serviços da categoria VBR (*Variable Bit Rate*), ou ainda, a usuários que não possuem TEs que cumpram com as exigências de comportamento solicitadas pelos serviços da categoria ABR, é capaz de garantir aos VCs uma taxa mínima de transmissão de células (MCR - *Minimum Cell Rate*), bem como a utilização da disponibilidade excedente de banda passante, a qual é entregue de acordo com as condições da rede [3].

Alguns mecanismos podem ser utilizados pela rede para garantia da MCR nas conexões GFR. Dentre eles merecem destaque os mecanismos de rotulação (*tagging*), de gerenciamento de *buffers* e de escalonamento (*scheduling*) [3].

Uma das possibilidades de implementação da categoria GFR é através da técnica Per-VC-WRR (*Weighted Round Robin*). Nesta técnica, o mecanismo de gerenciamento de *buffers* (FBA - *Fair Buffer Allocation*) e o mecanismo de escalonamento WRR são combinados de forma que estabelecida uma fila para cada VC, o mecanismo WRR agenda o instante de liberação de seus dados em função do nível de ocupação dos *buffers* dos *switches* ATM, cabendo ao mecanismo FBA reduzir tal nível sempre que o comprimento da fila de células de um determinado VC ultrapasse o limite para o descarte de células.

Neste trabalho propõe-se uma outra possibilidade de implementação da categoria GFR, que consiste na utilização de um mecanismo de controle ABR baseado na marcação da ER. Para isto emprega-se a técnica VS/VD (*Virtual Source/Virtual Destination*), com a finalidade de estabelecer um loop de controle ABR entre os *switches* ATM associados às unidades de transmissão ADSL (ATUs - *ADSL Transmission Unit*).

Considerando-se o emprego de aplicações TCP/IP, realiza-se neste trabalho um estudo comparativo a respeito da eficiência das categorias ABR e GFR na minimização dos efeitos da variação de banda passante oferecida a estas aplicações por uma rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL. A apresentação deste trabalho foi organizada conforme descrito a seguir.

Vale ressaltar que, um trabalho semelhante foi realizado por pesquisadores japoneses considerando-se apenas o controle de tráfego ABR que emprega as técnicas ABR-ER (ERICA+) e ABR-*Binary*, para os fluxos *upstream* e *downstream*, bem como se considerando estes fluxos simultaneamente [10].

O capítulo II, que é dedicado ao estudo do ATM sobre ADSL, inicia-se com uma apresentação das características gerais das redes ATM, seguindo-se com uma descrição das principais redes de acesso, com ênfase para aquelas baseadas no ADSL. Após uma descrição detalhada do transporte de células ATM sobre uma rede de acesso ADSL, apresentam-se o problema da variação de banda passante no enlace ADSL, bem como suas causas e as conclusões gerais a respeito do uso da tecnologia ATM sobre ADSL.

Nas seções iniciais do capítulo III, aborda-se o protocolo TCP com destaque para as suas técnicas de controle de congestionamento. Em seguida apresenta-se detalhadamente as categorias de serviço ABR e GFR, ressaltando-se os diversos algoritmos de controle empregados pelo ABR e os mecanismos utilizados na implementação dos serviços GFR. Na seqüência apresenta-se uma proposta de utilização do controle de tráfego ATM, através das categorias GFR e ABR, na minimização da variação de banda passante disponível para aplicações TCP/IP sobre uma rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL.

No capítulo IV, inicialmente apresenta-se o modelo de simulação adotado para o ambiente de rede considerado. Neste modelo estão incorporadas as aplicações TCP/IP, as variações de banda passante no enlace ADSL e também o controle de tráfego realizado pelo ATM. Na seqüência apresentam-se os parâmetros de entrada e saída utilizados pelo programa

simulador e que foram adotados para a realização dos estudos [17]. Para a solução do modelo adotou-se uma estratégia de execução baseada em dois cenários de simulação, os quais representam os fluxos de dados *upstream* e *downstream* e as categorias de serviço ABR e GFR em suas diversas implementações. A seguir, apresentam-se os resultados obtidos através das várias simulações realizadas, os quais, após analisados, foram comparados em termos da eficiência na implementação do controle de tráfego ATM sobre enlaces ADSL. Especificamente, compara-se as técnicas ABR-ER (algoritmos ERICA+ e EPRCA), ABR-*Binary*, GFR (Per-VC-WRR), a implementação da categoria de serviço GFR utilizando-se um mecanismo de controle ABR e, também quando não se utiliza qualquer tipo de controle (Sem Controle).

Para encerrar o capítulo IV apresentam-se as conclusões a respeito da eficiência do controle de tráfego ATM para minimização das variações de banda passante no enlace ADSL, enfatizando-se a técnica que melhor compensou estas variações.

Finalizando este trabalho, no capítulo V apresentam-se as conclusões gerais, suas principais implicações e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ATM SOBRE ADSL

2.1. INTRODUÇÃO

O crescimento da utilização de serviços que incorporam aplicações em banda larga, tais como, distribuição de vídeo, aplicações em tempo real, videoconferências e educação à distância, as quais requerem uma determinada banda passante e garantia de qualidade de serviço, motivou o desenvolvimento da tecnologia ATM sobre ADSL. Esta tecnologia alia a flexibilidade na alocação de bandas passantes e o suporte à qualidade de serviço típicos do ATM ao serviço de acesso em banda larga propiciado pelo ADSL.

O ADSL é uma tecnologia posicionada no nível físico que permite o acesso a diversos tipos de rede, sendo caracterizada pela transmissão assimétrica das informações. Esta tecnologia habilita a transmissão de uma grande quantidade de informações sobre uma linha telefônica convencional a custos razoáveis para as companhias telefônicas e também para os usuários. Com a sua utilização será possível atender a crescente demanda por novos tipos de aplicações em banda larga por meio da infra-estrutura já instalada baseada em cabos de pares metálicos de cobre. Dessa forma, esta demanda pode ser atendida sem a necessidade de vultuosos investimentos.

Um dos problemas relevantes em se tratando do desempenho de uma rede de acesso ADSL, é a variação da banda passante disponível no enlace ADSL. Neste enlace, a banda

passante está sujeita a variações no decorrer do tempo, ocasionadas, sobretudo pelas alterações das condições operacionais e propriedades físicas do meio de transmissão, tais como, variações de temperatura e interferências eletromagnéticas (*crosstalk*, ruído impulsivo, sinalização telefônica, etc). Logo, para que os requisitos de QoS das aplicações em banda larga transportadas sobre uma rede de acesso ADSL possam ser atendidos, se faz necessário o emprego de técnicas que minimizem a influência das variações da banda passante nos referidos requisitos.

Neste capítulo, dedicado ao estudo do ATM sobre ADSL, apresentam-se às características gerais das redes ATM e das principais redes de acesso, enfatizando-se a implementação baseada no ADSL. Por fim, apresenta-se o transporte de células ATM sobre uma rede de acesso ADSL, o problema de variação de banda passante no enlace ADSL e suas causas e, logo em seguida as conclusões relacionadas com a tecnologia ATM sobre ADSL.

2.2. REDES ATM

O ATM é caracterizado pela transmissão orientada a pacotes utilizando a técnica de multiplexação por divisão de tempo, a qual é realizada de forma assíncrona [18].

As redes constituídas por esta tecnologia, denominadas redes ATM, combinam os benefícios da comutação de circuitos com os benefícios da comutação de pacotes. Tais comutações são realizadas pelos *switches* ATM.

A tecnologia ATM rapidamente dominou o cenário da interconexão de LANs (*Local Area Networks*) e WANs (*Wide Area Networks*), devido sobretudo a sua capacidade de comutar e transportar múltiplos tipos de tráfego, associada a sua alta escalabilidade [18].

Os fluxos de dados do ATM são organizados em blocos de tamanho fixo, chamados células. Cada célula é constituída por um cabeçalho de 5 octetos e um campo destinado às

informações, chamado de carga útil, o qual é composto de 48 octetos. A figura 2.1 ilustra a estrutura de uma célula ATM.

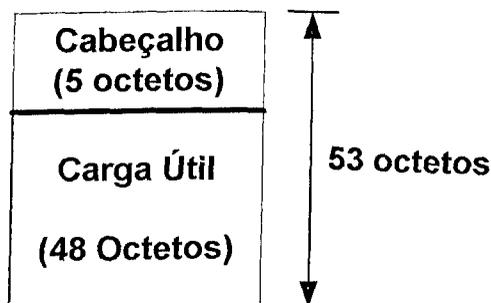


Figura 2.1. Estrutura de uma célula ATM.

O cabeçalho das células ATM é dividido em campos, os quais permitem a realização de diversas funções, como roteamento, desassociação de taxas de transmissão e identificação de diferentes tipos de células. Existem dois formatos para este cabeçalho, os quais são aplicáveis respectivamente à comunicação entre dispositivos através da interface usuário-rede (UNI - *User-Network Interface*) ou da interface rede-rede (NNI - *Network-Network Interface*).

Fundamentalmente existem dois tipos de conexões ATM, as Conexões Virtuais Permanentes ou PVCs (*Permanet Virtual Connections*) e as Conexões Virtuais Comutadas ou SVCs (*Switched Virtual Connections*).

As PVCs são conexões geralmente estabelecidas pela intervenção da administração da rede. Tais conexões apresentam uma natureza estática, uma vez que, permanecem inalteradas até que ocorra uma nova intervenção. Já as SVCs são conexões estabelecidas dinamicamente através de um protocolo de sinalização, não requerendo intervenção manual. Estas conexões são liberadas após o término da transmissão.

Independente de serem permanentes ou comutadas, as conexões ATM podem assumir configurações ponto a ponto, ponto a multiponto e multiponto a multiponto.

2.2.1. Modelo de Camadas ATM

O modelo de camadas ATM, apresentado na figura 2.2, é formado por três planos, o plano de usuário, o plano de controle e o plano de gerência, e por três camadas, a camada física, a camada ATM e a camada de adaptação ao ATM, que são seguidas pelos protocolos e aplicações das camadas superiores [18].

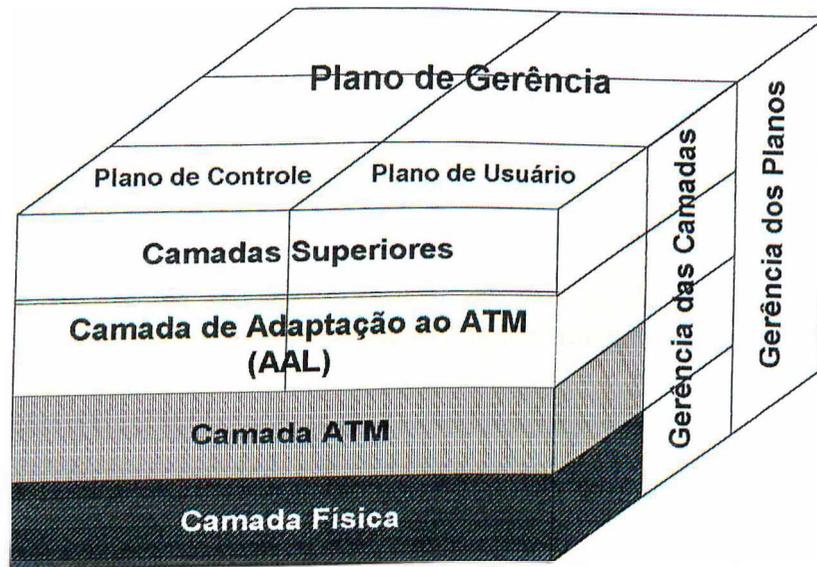


Figura 2.2. Modelo de Camadas.

Os três planos do modelo de camadas ATM são responsáveis pelas seguintes funções:

- **Plano de Usuário:** é responsável pela transmissão de informações do usuário através da rede. Os controles associados a esta transmissão, tais como, controle de fluxo e controle de erros, também ficam a cargo deste plano, bem como as retransmissões que forem necessárias.

- Plano de Controle: é responsável pela troca de informações de sinalização necessárias ao controle das conexões e pelas funções essenciais aos serviços de comutação ATM. O plano de controle cuida ainda da sinalização e do roteamento necessários ao estabelecimento, supervisão e liberação das SVCs.
- Plano de Gerência: é dividido em dois outros planos que juntos são responsáveis pelas funções de gerenciamento das camadas e dos planos.
 - Gerência de Camadas: é responsável pelas funções de gerência relacionadas aos recursos e parâmetros necessários ao tratamento dos fluxos de OAM (*Operation and Maintenance*).
 - Gerência dos Planos: é responsável pelas funções de gerência relacionadas com a coordenação entre os planos e gerência do sistema como um todo.

Já as camadas do modelo ATM são responsáveis pelas seguintes funções:

- A Camada Física consiste de duas subcamadas, a Subcamada de Meio Físico (*PM - Physical Medium Sublayer*) e a Subcamada de Convergência de Transmissão (*TC - Transmission Convergence Sublayer*). Estas subcamadas são responsáveis pelas funções dependentes do meio físico utilizado, e que realizam as transformações dos fluxos de células em fluxos de bits, a fim de serem transmitidos pelo meio físico.
 - Subcamada de Meio Físico: realiza as funções necessárias à codificação compatível com o meio de transmissão, bem como especifica as características elétricas, mecânicas e ópticas deste meio. Esta subcamada é responsável ainda pelo sincronismo necessário à transmissão e recepção de bits.

- Subcamada de Convergência de Transmissão: realiza as funções necessárias à geração, estruturação e recuperação de quadros, ao delineamento de células, ao desacoplamento entre as taxas de transmissão e ao transporte dos conjuntos de bits com funções específicas de OAM.
- A Camada ATM é responsável pelas funções empregadas na multiplexação e demultiplexação de células, na inserção e remoção dos cabeçalhos das células, e a translação de VPI/VCI. Esta camada é independente do meio físico.
- A Camada de Adaptação ao ATM é responsável pelas funções que suportam os serviços requeridos pelas camadas superiores, ou seja, esta camada suporta o mapeamento das camadas superiores para a camada de transporte ATM comum, com protocolos específicos para cada tipo de serviço. Suas funções são divididas em duas subcamadas, a Subcamada de Segmentação e Remontagem (*SAR - Segmentation and Reassembly Sublayer*) e a Subcamada de Convergência (*CS - Convergence Sublayer*).
 - Subcamada de Segmentação e Remontagem: realiza a segmentação das informações provenientes das camadas superiores em blocos adequados para o campo de informação das células.
 - Subcamada de Convergência: realiza as funções dedicadas a propiciar serviços específicos de transporte para os protocolos das camadas superiores.

2.2.2. Categorias de Serviço ATM

Atualmente, a Qualidade de Serviço (QoS - *Quality of Service*) tem se destacado no que diz respeito ao interesse das pesquisas relacionadas com redes de computadores. Este interesse é justificado pela crescente demanda por aplicações em banda larga (multimídia

interativa, distribuição de vídeo, etc), as quais se caracterizam, sobretudo por um elevado nível de exigências para o seu transporte e operação.

Neste contexto, as redes ATM merecem destaque, uma vez que a tecnologia ATM suporta uma grande variedade de parâmetros de QoS, os quais são estabelecidos em função de determinadas categorias de serviço. Tais categorias são definidas considerando-se aspectos como o transporte em tempo real ou não, tráfegos em surtos ou contínuos, além de limites para o tempo de resposta da rede em função do tipo de aplicação sendo transportada [3].

Nesta seção serão apresentadas as categorias de serviço ATM, as quais foram divididas pelo ATM Forum da seguinte forma [3]:

- CBR (*Constante Bit Rate*)
- rt-VBR (*Real-Time Variable Bit Rate*)
- nrt-VBR (*Non-Real-Time Variable Bit Rate*)
- UBR (*Unspecified Bit Rate*)
- ABR (*Available Bit Rate*)
- GFR (*Guaranteed Frame Rate*)

Estas categorias de serviço apresentam características de tráfego e requisitos de QoS associados ao comportamento da rede. Funções tais como, roteamento, Controle de Admissão de Conexão (CAC) e alocação de recursos são estruturadas de forma diferenciada para cada umas dessas categorias.

De forma mais específica, as categorias de serviço ATM são definidas de acordo com os seguintes parâmetros de tráfego e QoS:

- Parâmetros de Tráfego

- PCR (*Peak Cell Rate*): define a taxa de pico
 - SCR (*Sustainable Cell Rate*): define a taxa média
 - MBS (*Maximum Burst Size*): define o número máximo de células que podem ser enviadas na PCR
 - MFS (*Maximum Frame Size*): define o tamanho máximo do quadro
 - MCR (*Minimum Cell Rate*): define a taxa mínima de transmissão que a rede se compromete a oferecer
 - CDVT (*Cell Delay Variation Tolerance*): define a tolerância na variação do retardo de transmissão de uma célula
- Parâmetros de QoS
 - CDV_{pp} (*Peak-to-Peak Cell Delay Variation*)
 - CTD_{max} (*Maximum Cell Transfer Delay*)
 - CLR (*Cell Loss Rate*)

Os parâmetros de tráfego definem as características gerais do tráfego que está sendo transmitido, enquanto que os parâmetros de QoS definem o comportamento que o tráfego deve seguir a fim de se obter um determinado nível de QoS.

A seguir serão apresentadas as categorias de serviço ATM, destacando-se suas principais características e aplicações.

- Categoria de Serviço CBR

A categoria CBR é aplicada a conexões que exigem a disponibilidade de uma banda passante fixa durante o intervalo de tempo de existência da conexão. Tal banda passante é

caracterizada pela PCR. Neste contexto, caso o usuário não ultrapasse o limite estabelecido pela PCR, a rede se compromete a garantir a QoS negociada no instante do estabelecimento da conexão.

As células que sofrem um atraso maior que o especificado pelo parâmetro CTD_{max} são desconsideradas pela aplicação, e portanto, podem ser marcadas ou descartadas pelos *switches* ATM.

A categoria CBR é então apropriada a aplicações em tempo real que não suportam variações significativas no retardo de transmissão, ou seja, que exigem baixo CDV. Exemplos de aplicações que podem utilizar o CBR são: voz, vídeo e emulação de circuitos.

- Categoria de Serviço rt-VBR

A categoria rt-VBR também se destina a aplicações em tempo real, uma vez que tais aplicações apresentam alta sensibilidade ao retardo de transferência e suas variações (*jitter*). As conexões que empregam esta categoria são caracterizadas pelos parâmetros PCR, SCR e MBS, os quais são definidos em função do comportamento surtivo da fonte de transmissão. Este serviço pode suportar multiplexação estatística de fontes em tempo real, e também desconsidera as células que sofrem retardo maior que o especificado pelo parâmetro CTD_{max} .

Exemplos de aplicações que podem trabalhar com o rt-VBR são: voz e vídeo comprimidos.

- Categoria de Serviço nrt-VBR

Esta categoria destina-se a aplicações que não sejam em tempo real e que apresentem tráfego surtivo, além de serem também caracterizadas em termos dos parâmetros PCR, SCR e MBS. Nesta categoria de serviço não existe a preocupação com o retardo de transmissão ou

suas variações, e para as aplicações que estiverem transmitindo de acordo com o contrato de tráfego, espera-se uma baixa taxa de perda de células (CLR).

A categoria nrt-VBR também suporta multiplexação estatística de conexões. Um bom exemplo de aplicação é a transferência de dados com requisitos de tempo de resposta crítico, como reservas de companhias aéreas, transações bancárias e monitoração de processos.

- Categoria de Serviço UBR

Esta categoria também é destinada a aplicações que não sejam em tempo real, uma vez que ela não oferece qualquer garantia quanto ao suporte dos parâmetros relacionados com o atraso de transmissão (CTD) e com a perda de células (CLR). O serviço fornecido é do tipo melhor esforço.

Um exemplo típico de aplicação desta categoria de serviço é o tráfego de dados tradicional tal como transferência de arquivos e correio eletrônico.

- Categoria de Serviço ABR

A categoria ABR é adequada a aplicações que não sejam em tempo real, sendo também não sensível ao atraso de transmissão e suas variações. Contudo, esta categoria oferece garantia de taxa de célula mínima (MCR) e baixa taxa de perda de célula (CLR), através de um mecanismo de controle de fluxo, para as fontes que respeitarem o contrato de tráfego. Tais fontes compartilham a banda passante disponível.

- Categoria de Serviço GFR

A categoria GFR, como as categorias UBR e ABR, também se destina a aplicações que não sejam em tempo real. Ao utilizarmos os serviços da categoria GFR, tais aplicações

podem requerer a garantia de uma taxa mínima de transmissão e ainda se beneficiarem do acesso a banda passante adicional disponibilizada dinamicamente na rede.

Especificamente, o serviço GFR destina-se a usuários que não podem especificar todos os parâmetros que são necessários numa solicitação por serviços da categoria VBR e que não possuem equipamentos terminais (TEs) que cumpram com as exigências de comportamento solicitadas pelos serviços da categoria ABR. Embora tais usuários possam recorrer às conexões UBR, as mesmas não oferecem qualquer garantia de serviço.

Conclui-se, portanto, que os serviços oferecidos pela categoria GFR apresentam pouca interação entre os usuários e a rede, porém com a garantia de uma taxa mínima de transmissão e uma baixa taxa de perda de células para os quadros que não excederem os limites especificados.

Maiores detalhes a respeito das categorias de serviço ABR e GFR, as quais serão utilizadas para a realização do controle de tráfego ATM proposto neste trabalho, serão tratados no capítulo 3.

2.3. REDES DE ACESSO

O crescimento da utilização de serviços que incorporem aplicações em banda larga está relacionado a construção de uma infra-estrutura de acesso que acomode estes serviços.

Em linhas gerais, esta infra-estrutura de acesso corresponde a uma rede que atribui capacidade de acesso a diversos tipos de terminais de usuários, permitindo-lhes acessarem os vários provedores, ou nós de serviço específico, localizados nos extremos das redes [4].

Atualmente, diversos estudos estão sendo realizados com o intuito de atribuir um alto grau de versatilidade às redes de acesso. Pretende-se com isto a criação de interfaces que permitam a conexão de diversos tipos de usuários.

As redes de acesso podem ser conectadas a múltiplos nós de serviços provendo um grande número de aplicações, bem como a múltiplos nós que suportem a mesma aplicação. Geralmente, a sinalização de cada serviço em específico é manipulada transparentemente através da rede de acesso, sendo finalizada no correspondente nó de serviço.

Neste contexto, propõe-se várias soluções para o nível físico, as quais são baseadas em diversas topologias e utilizam uma grande variedade de meios físicos de transmissão, destacando-se os cabos coaxiais, os cabos de pares metálicos trançados e as fibras ópticas. Vale ressaltar ainda o emprego de soluções não cabeadas (*wireless*), incluindo-se os sistemas via satélite.

Na seção seguinte são apresentadas algumas das principais redes de acesso atualmente em uso.

2.3.1. Tecnologias de Acesso

Entre as principais tecnologias de redes de acesso em uso, destacam-se a família xDSL, *Cable Modems*, as tecnologias FTTx, a tecnologia HFC, os sistemas via satélite e vários tipos de sistemas de distribuição em rádio frequência (xMDS). A figura 2.3 apresenta estas tecnologias [4].

A família xDSL (*Digital Subscriber Line*) de tecnologias de acesso permite a operação sobre a rede de telefonia pública, a qual é composta basicamente de cabos de pares metálicos. Claramente, um dos aspectos mais relevantes da família xDSL é a possibilidade de transferência de informações sobre esta infra-estrutura de comunicação. Entre os membros da família xDSL, destacam-se o HDSL, o SDSL, o IDSL, o VDSL e o ADSL, cuja tecnologia permite sobretudo às companhias telefônicas entregarem aos usuários serviços de valor agregado, o que permitirá o prolongamento da vida útil das atuais linhas telefônicas [19]. O

ADSL será o tema da próxima seção, tendo em vista sua importância na realização deste trabalho.

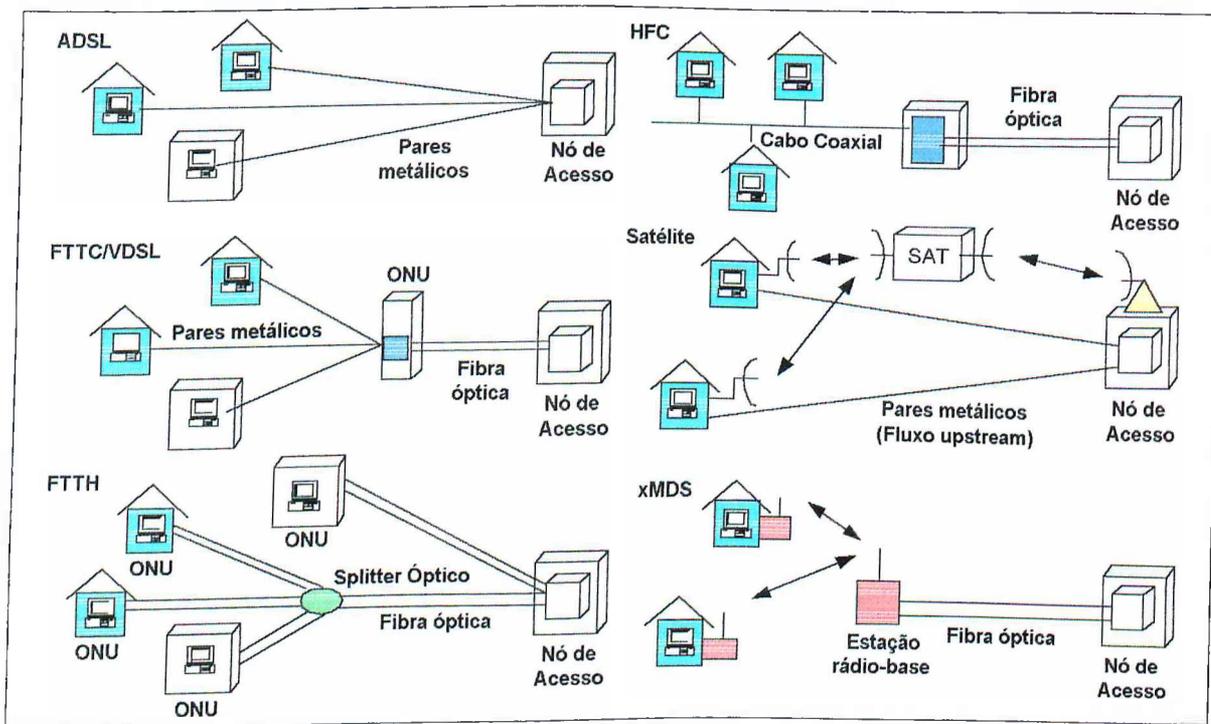


Figura 2.3. Tecnologias de Acesso.

O HDSL (*High Bit Rate Digital Subscriber Line*) corresponde a primeira versão de tecnologias xDSL. Desenvolvida no final da década de 80 esta tecnologia permite transmissões *full-duplex* simétricas a aproximadamente 800 kbps utilizando-se um par trançado, podendo ainda transmitir a 1,5 Mbps e 2 Mbps, com a utilização de dois e três pares trançados, respectivamente. Tais valores de transmissão apresentam uma providencial semelhança com os padrões T-1 (1,5 Mbps) e E-1 (2 Mbps), pois permitem a entrega de serviços de banda larga sobre a rede metálica. Vale ressaltar que a distância máxima alcançada pelos enlaces HDSL, sem que se perca suas potencialidades é de 3,6 km.

O SDSL (*Single-Line Digital Subscriber Line*) embora apresente a mesma natureza simétrica que o HDSL permite o alcance de taxas de transmissão em torno de 2 Mbps utilizando um único par trançado, além da transmissão de sinais de voz nesta mesma linha. Já o IDSL (*Integrated Services Digital Network Digital Subscriber Line*) apresenta a capacidade de transmissão de dados a 144 kbps *full duplex*, com um alcance máximo de 5,5 km. Ao contrário do SDSL, tal tecnologia não é capaz de transportar sinais de voz, sendo, portanto totalmente dedicada ao transporte de dados.

Por fim, a tecnologia VDSL (*Very High Bit Rate Digital Subscriber Line*), que realiza transmissões assimétricas, apresenta altas taxas de transmissão para o fluxo *downstream*. Especificamente, são alcançadas taxas de transmissão *downstream* da ordem de 52 Mbps, porém em distâncias relativamente curtas (cerca de 500 m). Por este motivo, o VDSL é visto como o mais futurista dos membros da família xDSL, uma vez que sua expansão está relacionada com o advento de tecnologias como a FTTx (*Fiber to the Home* ou *Fiber to the Curb*).

Nas tecnologias FTTx a rede de acesso é composta por fibras ópticas o que as adequa às interfaces ONU (*Optical Network Unit*) presentes nas instalações dos usuários. Tendo em vista que a utilização de fibras ópticas reduz drasticamente certas restrições como o alcance e a banda passante disponível para as transmissões, o advento destas tecnologias permitirá a utilização em larga escala de aplicações com uso atualmente restrito, como a TV de alta definição (HDTV).

Desenvolvida para permitir aos usuários domésticos o acesso a aplicações em banda larga através da Internet, a tecnologia *Cable Modem*, que utiliza redes de cabos coaxiais, diferentemente da família xDSL, compartilha a banda passante destes cabos entre os usuários de uma vizinhança, como se eles formassem uma rede local. Sua capacidade de transmissão para o fluxo *downstream* pode alcançar até 30 Mbps e para o fluxo *upstream* até 10 Mbps,

porém com a ressalva de que o aumento do número de usuários implica na redução destes valores.

A tecnologia HFC (*Hybrid Fiber Coax*) é caracterizada principalmente pelo seu alto desempenho na transmissão de aplicações em banda larga. Tal desempenho é alcançado através da utilização de um *backbone* óptico, associado a uma malha de distribuição composta por cabos coaxiais. Contudo, o advento da tecnologia HFC encontra-se associado a uma grande malha de distribuição, o que ainda não é uma realidade em muitas localidades.

Nos sistemas via satélite são alcançadas altas taxas de transmissão para o fluxo *downstream* (rede – usuário) utilizando-se a técnica de modulação QPSK (*Quaternary Phase Shift Keying*), a qual permite a utilização de bandas passantes que podem chegar a 15 MHz [4]. Com o propósito de oferecer aos usuários a utilização de serviços interativos, o fluxo de informações do usuário para a rede (*upstream*) é comumente realizado através de cabeamento.

Os sistemas de distribuição via radiofrequência xMDS (*Multichannel Multipoint Distribution System* ou *Local Multipoint Distribution System*) são atualmente utilizados como uma alternativa à tecnologia HFC. Nestes sistemas são também disponibilizadas altas bandas passantes (aproximadamente 10 MHz), porém a um custo ainda elevado [4].

2.3.2. A Tecnologia ADSL

O ADSL é uma tecnologia posicionada no nível físico que permite o acesso a diversos tipos de rede, sendo caracterizada pela transmissão assimétrica das informações. Esta tecnologia habilita a transmissão de uma grande quantidade de informações sobre uma linha telefônica convencional a custos razoáveis para as companhias telefônicas e também para os usuários. Com sua utilização será possível atender a crescente demanda por novos tipos de aplicações em banda larga, através da infra-estrutura baseada em cabos de pares metálicos de cobre, sem a necessidade de vultuosos investimentos.

A capacidade de transmissão da tecnologia ADSL está ligada a fatores como a qualidade da linha, o alcance da transmissão e a direção do fluxo de informações, considerando-se a natureza assimétrica do acesso por ela realizado. Tendo em vista que a grande variedade de aplicações que utilizam a rede de acesso ADSL seguem em sua maioria o modelo típico cliente-servidor, onde predomina o envio do fluxo de dados em direção ao usuário (fluxo *downstream*), a capacidade de transmissão para este fluxo varia entre 1,5 Mbps e 8 Mbps, enquanto que o fluxo de dados contrário (fluxo *upstream*) apresenta taxas variando entre 16 kbps e 1,5 Mbps [20]. As tabelas 2.1 e 2.2 apresentam respectivamente, algumas aplicações típicas do ADSL com seus requisitos de banda passante, e uma comparação entre as principais tecnologias de acesso e o ADSL [21].

Tabela 2.1. Aplicações Típicas ADSL.

Aplicações	Requisitos de Banda Passante (Mbps)
SOHO (<i>Small Office Home Office</i>)	0,014 - 6,0
Internet	0,500 - 1,5
Videoconferência	0,128 - 1,5
Educação à distância	0,500 - 6,0
VoD (<i>Video on Demand</i>)	3,0 - 6,0

O ADSL utiliza uma técnica de modulação padronizada pelo ANSI [5], denominada de DMT (*Discrete Multitone*), que consiste de um sistema de multi-portadoras divididas em blocos de dados que são transmitidos paralelamente. Esta técnica foi padronizada pelo ANSI por apresentar a melhor relação imunidade a ruído/flexibilidade de transmissão, se comparada a outras técnicas como, as técnicas QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e a técnica

CAP (*Carrierless Amplitude Phase Modulation*), que em linhas gerais, realizam a modulação de uma portadora simultaneamente em fase e amplitude [22].

Tabela 2.2. Comparação entre as principais redes de acesso e o ADSL.

Tecnologia	Taxa de Transmissão	Alcance	Aplicações
ADSL	1,5 - 8 Mbps <i>downstream</i> 16 kbps - 1,5 Mbps <i>upstream</i>	3,7 - 5,5 km	Acesso a Internet, VoD, SOHO, educação à distância, etc
<i>Cable Modem</i>	10 - 30 Mbps <i>downstream</i> 128 kbps - 10 Mbps <i>upstream</i> (compartilhados)	50 km sobre cabo coaxial (extensivo até 320 km)	Acesso à Internet e suas aplicações em banda larga
IDSL	144 kbps <i>full duplex</i>	5,5 km	Acesso a Internet/Intranet, <i>web browsing</i> , video-fone, etc
HDSL	1,544 Mbps <i>full duplex</i> (2 pares) 2,048 Mbps <i>full duplex</i> (3 pares)	3,7 - 5,5 km	Interconexão de PBX e de LANs, acesso a Internet
SDSL	1,544 Mbps <i>full duplex</i> 2,048 Mbps <i>full duplex</i> (1 par)	3,7 km	Interconexão de LANs
VDSL	13 - 52 Mbps <i>downstream</i> 1,5 - 2,3 Mbps <i>upstream</i>	0,3 - 1,3 km	Acesso às aplicações em banda larga da Internet, entrega de programação de TV de alta definição (HDTV), etc
FTTx	600 Mbps <i>downstream</i> 155 Mbps <i>upstream</i> 155 Mbps (simétrico)	30 km	Acesso às aplicações em banda larga da Internet, HDTV, telemedicina, etc
HFC	20 - 50 Mbps simétrico	30 km	Acesso a aplicações em banda larga
xMDS	10 - 45 Mbps <i>downstream</i>	10 - 56 km	Acesso a aplicações em banda larga
Satélite	40 Mbps <i>downstream</i> 153 kbps <i>upstream</i>	-----	Acesso às aplicações em banda larga da Internet, entrega de programação de TV de alta definição

A técnica DMT, apresentada na figura 2.4, aloca uma pequena fração da informação total em cada uma das diversas portadoras transmitidas em paralelo. Os diversos sub-canais são independentemente modulados com uma portadora de frequência correspondente à frequência central de transmissão. O padrão DMT do ANSI especifica 256 sub-portadoras (canais), cada qual com uma largura de banda de 4 kHz, em um espectro de frequências que varia entre 26 kHz e 1,1 MHz para aplicações em banda larga, e de 0 Hz até 4 kHz para sinais de voz. Esta técnica é capaz de adaptar dinamicamente o fluxo de dados às condições da linha para obter a máxima vazão por canal. Tal adaptação resulta da realização prévia de testes pelo modem ADSL em cada canal. De forma específica, o transmissor DMT mapea a quantidade de bits a ser transmitida em cada canal com base na relação sinal/ruído obtida a partir da análise das condições da linha. Para um canal que apresente relação sinal/ruído insatisfatória, é permitido ao transmissor a sua completa eliminação. Desta forma, são selecionados apenas os canais cujo desempenho permita uma suficiente alocação de bits [5].

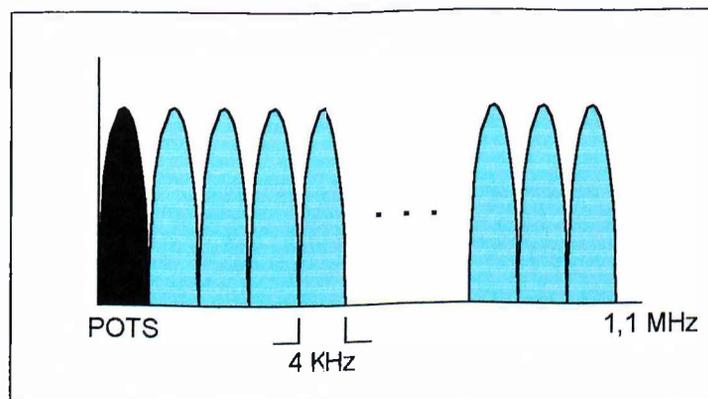
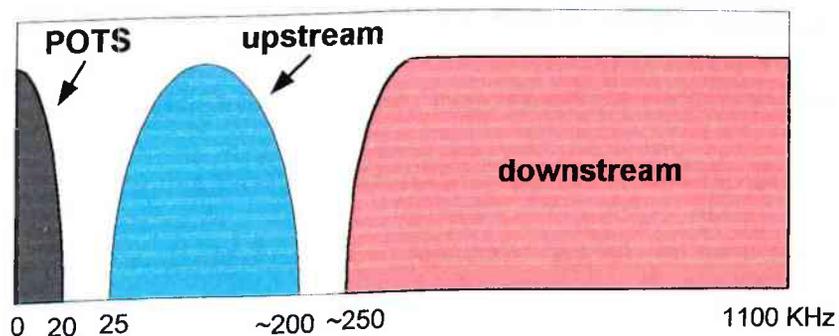


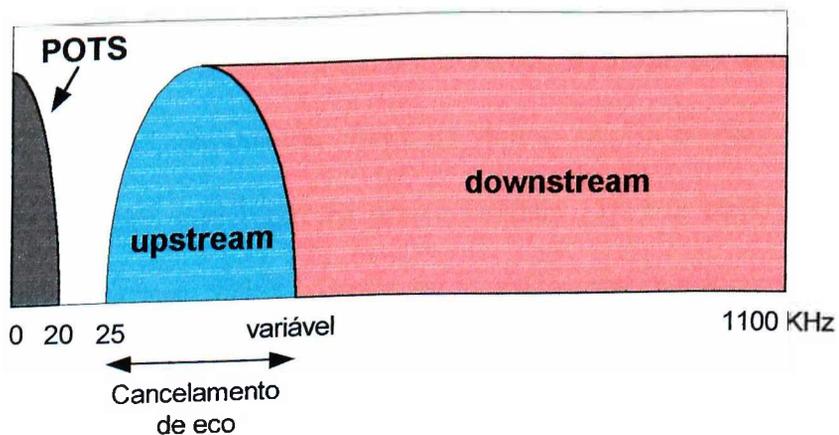
Figura 2.4. DMT (*Discrete Multitone*).

A técnica de multiplexação empregada pelo ADSL é a FDM (*Frequency Division Multiplexing*), a qual reserva a faixa inferior a 25 kHz para os sinais de voz, ou POTS (*Plain Old Telephone Services*), além de duas outras faixas de frequências. A primeira delas, que

varia entre 25 kHz e 200 kHz, é reservada ao fluxo *upstream* e a segunda, que varia entre 250 kHz e 1 MHz, é reservada ao fluxo *downstream* (Figura 2.5-a). É possível ainda, o emprego do cancelamento de eco que permite a utilização da mesma faixa de frequências em ambos os fluxos, através do incremento da área de sobreposição da faixa de frequências reservada ao canal *upstream* sobre a faixa reservada ao canal *downstream* (Figura 2.5-b). A utilização do cancelamento de eco ainda apresenta a vantagem de alocar grande parte da banda passante reservada ao canal *downstream* sobre uma porção do espectro menos susceptível a atenuação [5, 23]. Vale ressaltar que, em função da adoção de faixas de frequências diferentes para os sinais de voz e dados, é possível a transmissão simultânea destes sinais.



(a) Sem cancelamento de eco.



(b) Com cancelamento de eco.

Figura 2.5. FDM (*Frequency Division Multiplexing*).

O ADSL possui um quadro de transmissão denominado Superframe ADSL, o qual está apresentado na figura 2.6. O Superframe ADSL é composto por 68 quadros de dados ADSL numerados de 0 a 67. Estes quadros são codificados e modulados em 68 quadros de dados DMT, seguidos por um quadro de sincronização utilizado pelo modulador para estabelecer os limites do Superframe. Devido à inserção do símbolo de sincronização, a taxa de transmissão de cada quadro é equivalente a $68/69 \times 4000$ símbolos/seg. Em cada superframe, oito bits são reservados para o CRC (*Cyclic Redundancy Check*) e 24 bits são atribuídos para as funções de operação e manutenção (OAM). As ATUs enviam um Superframe a cada 17 mseg, sendo que cada quadro pertencente ao Superframe conterá dados do *fast buffer* e do *interleaved buffer* [5, 24].

Tendo em vista que o ADSL opera sobre um meio físico de transmissão sujeito a diversos distúrbios, para que as aplicações em banda larga possam ser transportadas sobre sua rede de acesso, se faz necessário o emprego de técnicas de correção de erros (*FEC - Forward Error Correction*) como a técnica *Reed Solomon*, associadas à transmissão através de fluxos com diferentes latências. De forma mais específica, serão transmitidos dois tipos de fluxos de dados, o primeiro deles denominado fluxo de dados intercalados (*Interleaved Data Stream*), adequado para serviços que exijam baixa taxa de erros na transmissão porém admitindo elevada latência, e o segundo denominado fluxo de dados não intercalados (*Fast Data Stream*), adequado aos serviços que requerem baixa latência [5]. Em consequência disto, diferentes configurações de acesso ADSL devem ser consideradas, mais precisamente será possível a implementação de latência simples, não necessariamente a mesma para cada direção de transmissão, latência dupla para a direção *downstream* e latência simples para a direção *upstream*, ou ainda latência dupla para as direções *downstream* e *upstream*.

Conforme ilustra a figura 2.7 que representa os fluxos de dados, os sinais transmitidos pelos canais *fast* e *interleaved* passam separadamente pela detecção de erros (CRC). Na

sequência, os sinais são embaralhados (função *Scrambler*) e submetidos à função FEC. No canal *interleaved*, além das operações anteriores os sinais são submetidos ao processo de intercalamento (função *Interleaver*). A seguir, os dois fluxos de dados passam pelo processo de modulação [5, 25].

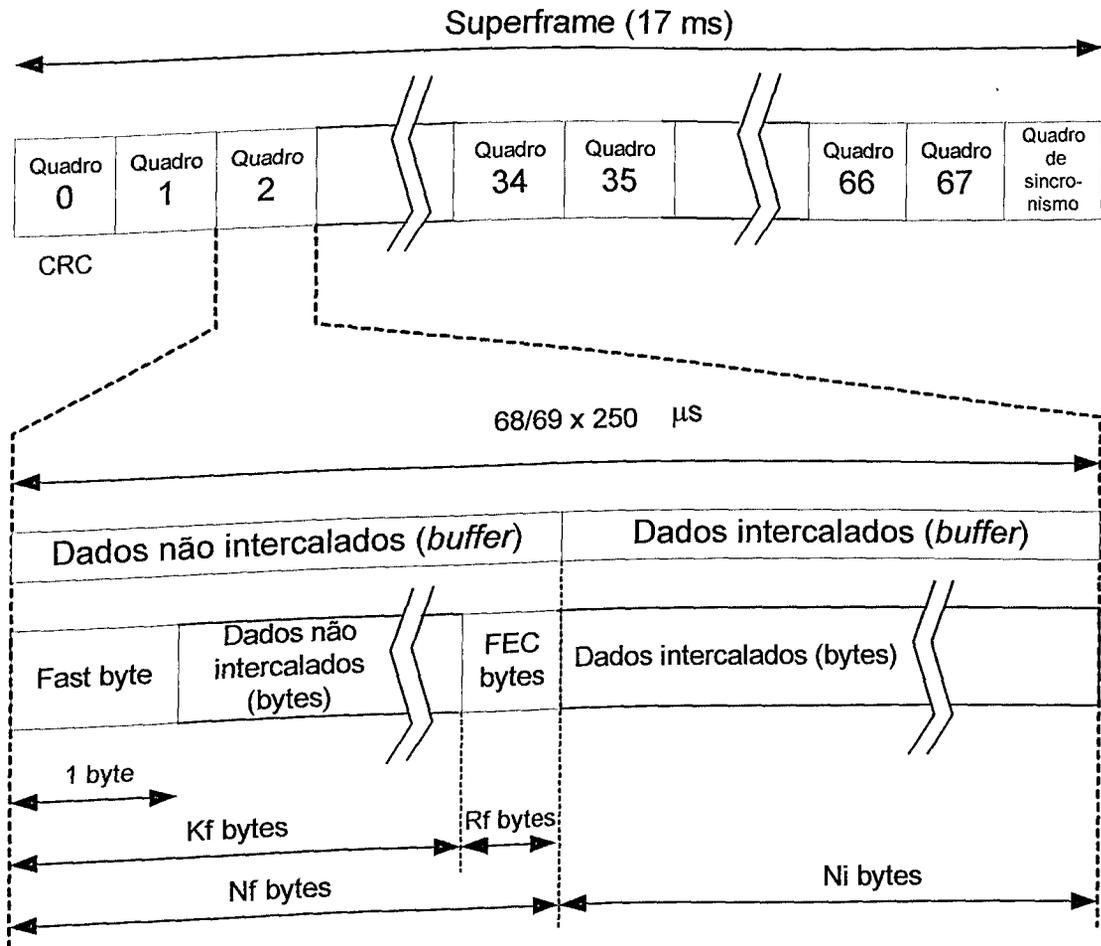


Figura 2.6. Superframe ADSL.

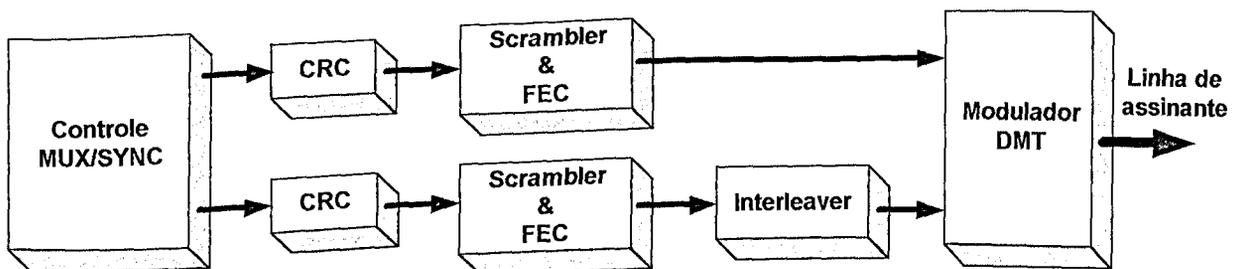


Figura 2.7. Fluxos de Dados.

Geralmente as funções FEC operam através da transmissão de uma palavra-código (*codeword*) que contém informações adicionais. Tais informações, as quais são consideradas redundantes na palavra-código, é que permitem a detecção de erros ocorridos durante a transmissão dos dados.

Na tecnologia ADSL, a função FEC emprega o método *Reed Solomon*, onde a palavra-código é criada pela adição de bytes redundantes que são gerados utilizando-se uma divisão polinomial. Tal método é capaz de corrigir erros de acordo com o limite imposto pelo comprimento da palavra-código. Especificamente, para o fluxo de dados não intercalados uma palavra-código *Reed Solomon* é criada pela adição de bytes corretores de erro em cada quadro. Já para o fluxo de dados intercalados, o intercalamento de informações provenientes de diferentes quadros aumenta a eficiência da correção de erros, haja vista que os dados de quadros livres de erros serão intercalados aos dados de quadros onde o nível de erros é alto. Outro fator preponderante da eficiência da função FEC para o fluxo de dados intercalados é a adoção de uma palavra-código de maior comprimento [26].

2.4. O Problema da Variação de Banda Passante no Enlace ADSL e suas Causas

Um dos problemas relevantes em se tratando do desempenho de uma rede de acesso ADSL, é a variação de banda passante disponível no enlace ADSL. Neste enlace, a banda passante está sujeita a variações no decorrer do tempo, ocasionadas, sobretudo pelas alterações das condições operacionais e propriedades físicas do meio de transmissão, tais como, variações de temperatura e interferências eletromagnéticas (*crosstalk*, ruído impulsivo, sinalização telefônica, etc). Estas alterações ocasionam a modificação da relação sinal/ruído medida em cada sub-portadora pela técnica de modulação DMT. Especificamente, através desta medida as ATUs determinam e ocasionalmente alteram o *bit mapping* das sub-

portadoras, ou seja, o número de bits atribuídos a cada uma delas. Como resultado desta alteração do número de *bits* que serão transportados a cada momento, a banda passante sofrerá variações [5, 6, 10].

As interferências geradas pelo *crosstalk* são consideradas grandes limitações de desempenho dos sistemas ADSL, sendo representadas pelos ruídos NEXT (*Near End Crosstalk*) e FEXT (*Far End Crosstalk*). O NEXT representa a interferência gerada no receptor de um par pelo acoplamento de sinais provenientes do transmissor do par adjacente, devido a proximidade entre os pares. Por afetar principalmente sistemas que transmitem em ambas as direções ao mesmo tempo, o NEXT pode ser eliminado, em princípio, separando-se as transmissões em intervalos de tempo diferentes ou em faixas de frequências diferentes, como no caso do ADSL. Desta forma, converte-se uma transmissão duplex em transmissões simplex independentes, evitando portanto o NEXT, embora com o prejuízo da redução na banda passante. Vale ressaltar que nas faixas de frequências destinadas à operação do ADSL, a eliminação do NEXT compensa a redução da banda passante. Por outro lado, o FEXT representa a interferência gerada pelo acoplamento de sinais provenientes do transmissor de um par, sobre o receptor de outro par oposto ao ponto de transmissão, ou seja, distante deste ponto, sendo seu valor proporcional a $|H(f)|^2 * d * f^2$, onde $H(f)$ é a função de transferência do enlace, d é o comprimento do referido enlace e f a frequência de transmissão. A figura 2.8 ilustra as interferências geradas pelo *crosstalk*.

Em adição aos ruídos gerados pelo *crosstalk*, aplicações externas podem gerar ruído impulsivo que representa outro fator responsável pelas limitações dos sistemas ADSL. Este ruído apresenta pulsos com amplitudes cuja ordem de grandeza varia entre 1 mV e 40 mV em intervalos de duração de 100 μ s até 1 ms, o que torna sua modelagem uma tarefa extremamente complexa, ocasionando dificuldades no que diz respeito à precisão dos resultados obtidos em medidas do seu valor nominal.

Interferências creditadas à sinalização telefônica, que são geradas pela utilização dos circuitos de conexão das centrais telefônicas, também representam fatores de degradação da qualidade do sinal transmitido. Para seus testes são utilizadas determinadas sinalizações e atividades de alerta freqüentemente desempenhadas pelas centrais de comutação, onde se observa também a presença do *crosstalk* [6, 27, 28, 29, 30].

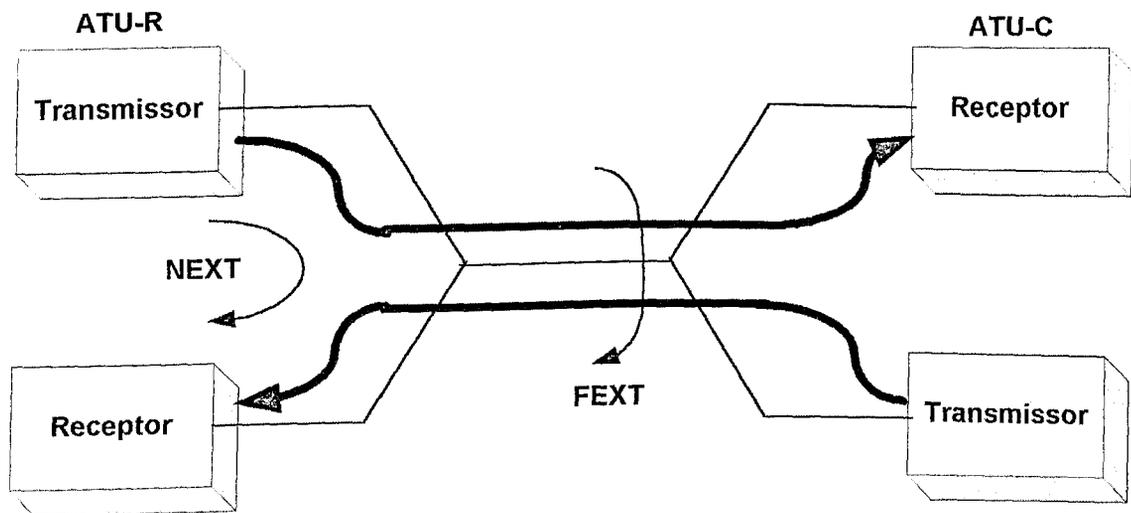


Figura 2.8. *Crosstalk* NEXT e FEXT.

2.5. TRANSPORTE DE CÉLULAS ATM SOBRE UMA REDE DE ACESSO ADSL

Apresentadas as principais características das redes ATM e da rede de acesso ADSL, apresenta-se nas seções seguintes uma descrição da realização do transporte de células ATM sobre uma rede de acesso ADSL, bem como os fatores envolvidos neste transporte.

2.5.1. Modelo de Referência

O modelo de referência apresentado na figura 2.9 foi desenvolvido com o objetivo de direcionar o projeto da arquitetura, das interfaces e dos protocolos de redes de

telecomunicações que incorporarem uma rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL. Neste modelo, observa-se na rede pública o modem ADSL do lado da central telefônica ATU-C (*ADSL Transmission Unit at the network end*), o qual desempenha as funções responsáveis pela moldagem e envio do tráfego ADSL, e os *splitters* que separam o sinal de voz dos dados. O sinal de voz é então enviado à rede de telefonia pública (PSTN - *Public Switch Telephone Network*) e os dados são transmitidos para o nó de acesso onde dispositivos adequados desempenham as funções necessárias ao envio dos referidos dados à rede ATM (multiplexação/demultiplexação de VCs, etc). Nas instalações do usuário está presente um outro modem ADSL, denominado ATU-R (*ADSL Transmission Unit at the customer end*), o qual desempenha as funções necessárias ao recebimento do tráfego ADSL, bem como a interface com a linha de assinante mais uma vez realizada por *splitters*. Neste caso, o sinal de dados é enviado a uma estação pessoal ou a uma rede PDN (*Premises Distribution Network*) [5, 9, 31, 32, 33, 34].

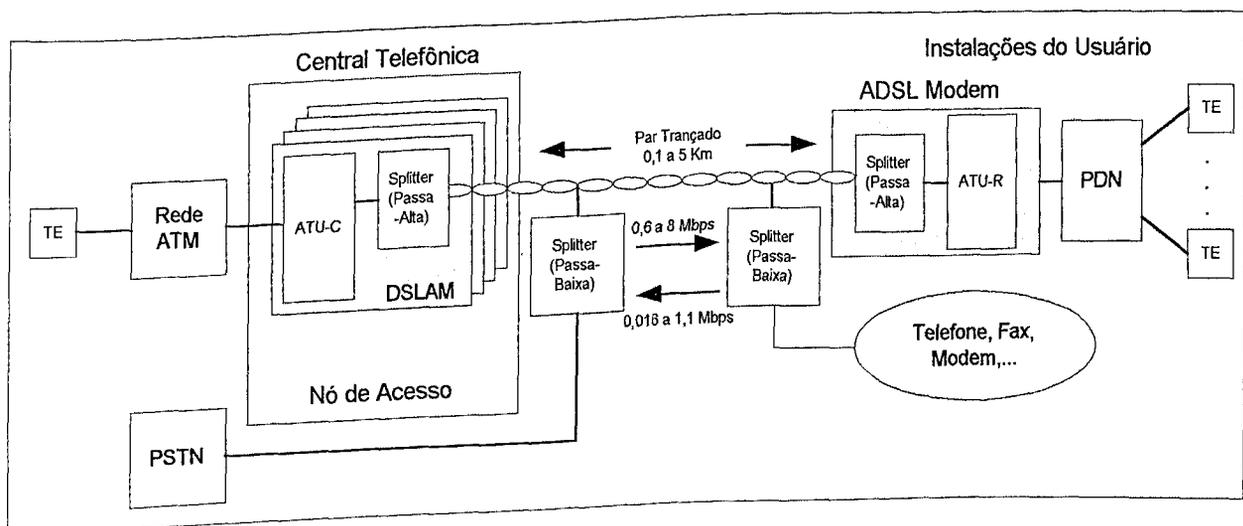


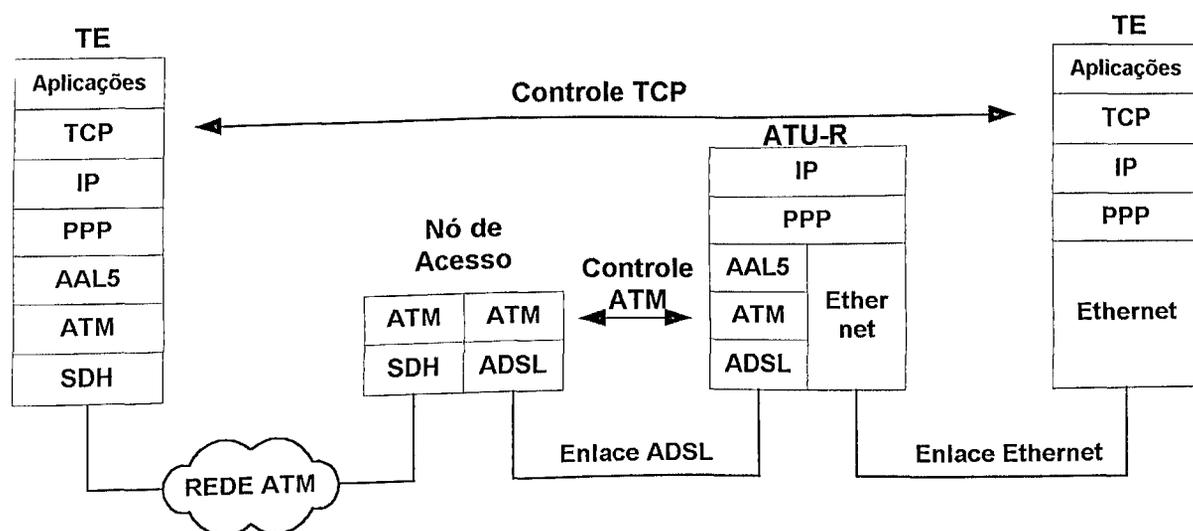
Figura 2.9. Modelo de Referência ADSL.

Considerando-se que para o alcance de um bom desempenho na transmissão de informações entre os diversos TEs de uma rede através de suas conexões é de vital

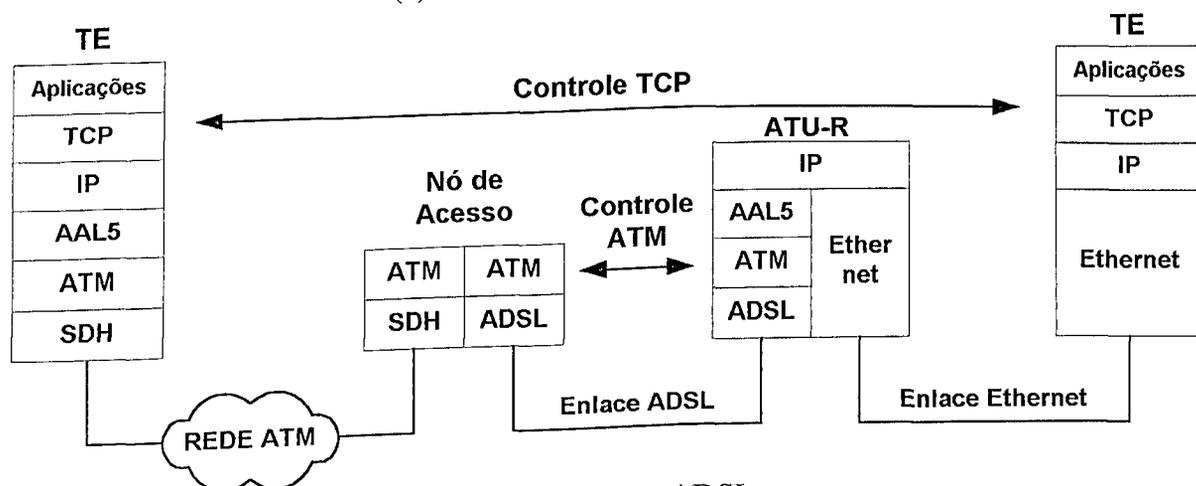
importância a implementação de um protocolo de transporte que permita o suporte a um determinado nível de QoS, neste trabalho considerou-se a arquitetura Internet TCP/IP, tendo em vista a necessidade de garantia de um nível mínimo de QoS, associado à redução do descarte de células, aos dados transportados através da rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL. Na referida arquitetura, onde predominam as aplicações orientadas à conexão, a utilização do protocolo de transporte TCP, permite a divisão do fluxo de informações em segmentos de dados distintos, os quais são transmitidos em função do policiamento realizado por seu controle de congestionamento. Vale ressaltar que associado ao controle de congestionamento TCP será também considerado o gerenciamento de tráfego ATM [35]. A figura 2.10 ilustra o posicionamento dos referidos controles através das pilhas de protocolos para o modelo de referência apresentado na figura 2.9, as quais representam respectivamente a implementação do ATM sobre ADSL com a utilização do protocolo PPP (*Point to Point Protocol*) e sem a utilização do referido protocolo.

A utilização do protocolo PPP sobre uma rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL tem o objetivo de associar vantagens deste protocolo, tais como, a autenticação e a autoconfiguração de endereços, a essa nova plataforma de acesso. Contudo, tal implementação não foi considerada na realização deste trabalho, uma vez que, a utilização do protocolo PPP adiciona um número considerável de bytes de *overhead* aos datagramas IP durante o processo de encapsulamento realizado de acordo com a RFC que trata do PPP sobre AAL 5 [36]. Como resultado deste *overhead*, haverá a necessidade de uso de duas células ATM para a transmissão de cada TCP ACK [37], o que acarretará em um aumento considerável da carga sobre o enlace ADSL, dificultando ainda mais o controle das variações em sua banda passante.

Considerando a implementação realizada, nota-se através da figura 2.10-b que o protocolo TCP realiza o fluxo de controle fim-a-fim entre as aplicações e que o controle ATM



(a) PPP sobre ATM sobre ADSL.



(b) ATM sobre ADSL.

Figura 2.10. Pilha de Protocolos.

é realizado entre o nó de acesso e o ATU-R. No nível de transporte, o protocolo TCP monta segmentos de dados com limite de comprimento especificado pelo parâmetro MSS (*Maximum Segment Size*). Tais segmentos são enviados de acordo com as janelas de congestionamento (CWND - *Congestion Window*) e de notificação (*Advertised Window*). Ao serem repassados para o nível inter-rede, os segmentos TCP são adequadamente alocados em datagramas IP. Alcançada a camada AAL, que está representada pela AAL5, ocorre o mapeamento entre os datagramas IP e as CPCS-PDU, sendo que cada datagrama IP é encapsulado dentro de uma CPCS-PDU. Em seguida, as CPCS-PDUs são fragmentadas pela SAR formando as SAR-

PDU, que possuem 48 bytes. Por fim, na camada ATM, as SAR-PDU são utilizadas na montagem das células ATM. A figura 2.11 ilustra o processo de obtenção das células ATM, descrito acima.

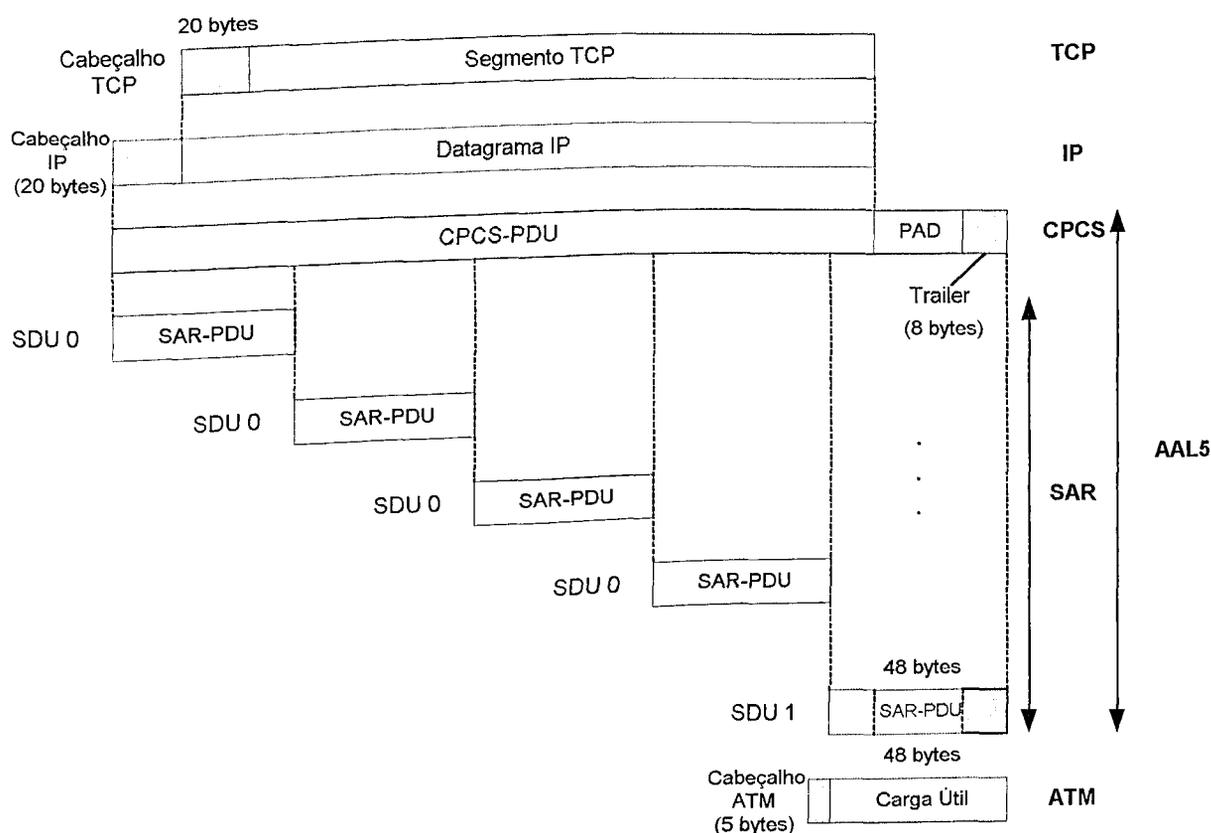


Figura 2.11. Obtenção de Células ATM.

2.5.2. DSLAM

O DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*), o qual faz parte do nó de acesso, constitui o principal componente das redes de acesso ADSL. Este dispositivo é responsável pela conexão das ATU-Cs ao *backbone* de acesso e também pela interface entre a rede ATM e a rede de acesso ADSL. Instalado na central telefônica, o DSLAM realiza o encaminhamento do fluxo de dados ao modem ADSL apropriado, bem como a demultiplexação do fluxo de dados *downstream* e, a multiplexação e concentração no fluxo de dados *upstream*. Este encaminhamento pode ser baseado em canais *Fast* ou *Interleaved* do

modem, o que fica condicionado à implementação da latência simples ou dual. O DSLAM é ainda conectado ao comutador ATM, o qual possui a função de concentrar e comutar o tráfego de um determinado número de nós de acesso. A figura 2.12 apresenta os detalhes internos do DSLAM [5, 2].

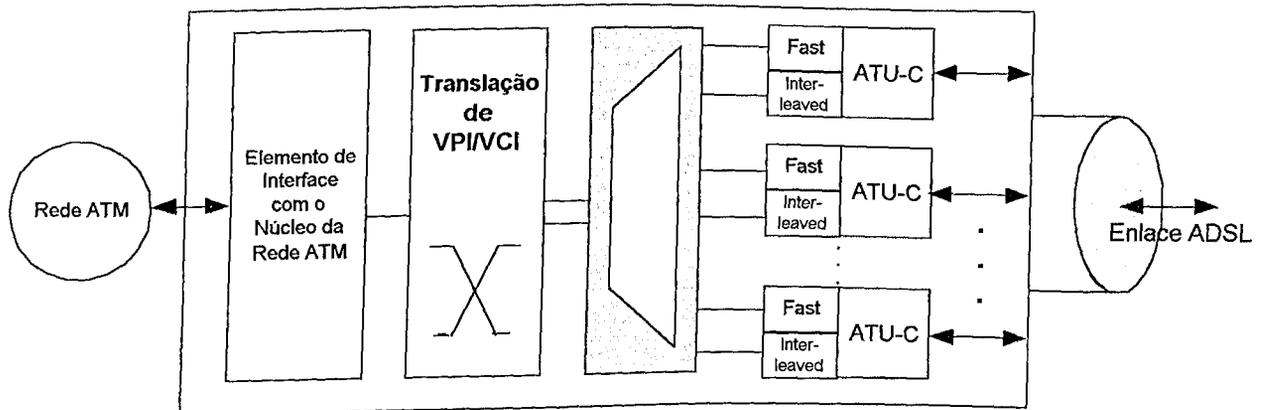


Figura 2.12. DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*).

2.6. CONCLUSÕES

Tendo em vista que o crescimento da utilização de aplicações em banda larga está associado ao desenvolvimento de tecnologias que disponibilizem a transmissão de informações a velocidades relativamente altas e com a garantia de um determinado nível de QoS, a tecnologia ATM sobre ADSL apresenta-se como uma alternativa viável no presente momento.

Tal afirmação baseia-se nas características de flexibilidade na alocação de bandas e suporte a QoS, típicas da tecnologia ATM, considerando-se principalmente o controle de tráfego realizado por esta tecnologia. Associada às características do ATM deve ser ainda considerado a utilização da tecnologia ADSL, que possibilita através da aplicação de avançadas técnicas de codificação de sinais e correção de erros, a transmissão de aplicações

em banda larga empregando-se as atuais linhas telefônicas compostas de cabos de pares metálicos.

Vale ressaltar que, esta nova plataforma de acesso representada pela tecnologia ATM sobre ADSL possui um problema relacionado com a variação de banda passante no enlace ADSL, a qual é ocasionada sobretudo pelas alterações das condições operacionais e propriedades físicas do meio de transmissão. Para a solução deste problema será empregado o controle de tráfego ATM a ser realizado pelas categorias de serviço ABR e GFR.

Conclui-se, portanto que a associação entre as redes de acesso ADSL e as redes ATM permite a implementação de redes de acesso convencional para a utilização de aplicações em banda larga.

CAPÍTULO 3

UMA PROPOSTA PARA A MINIMIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DE BANDA PASSANTE DISPONÍVEL PARA APLICAÇÕES TCP/IP

3.1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista a variação de banda passante disponível no enlace ADSL, para que seja alcançado um bom desempenho na transmissão de informações sobre uma rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL, é de fundamental importância a implementação de um protocolo de transporte e de um controle de tráfego que permitam o suporte a um determinado nível de QoS. Neste contexto, considerou-se a arquitetura Internet TCP/IP, onde predominam as aplicações orientadas à conexão, e também o controle de tráfego ATM, realizado pelas categorias ABR e GFR.

No que diz respeito à arquitetura Internet TCP/IP, a utilização do protocolo de transporte TCP permite a divisão do fluxo de informações em segmentos de dados distintos, os quais são transmitidos em função do policiamento realizado fim a fim por seu controle de congestionamento. Já o emprego do controle de tráfego ATM tem o claro objetivo de combater fatores como o atraso de enfileiramento, que provocam a degradação da QoS.

Portanto, neste capítulo serão apresentados os algoritmos que realizam o controle de congestionamento TCP e as categorias de serviço ATM empregadas no controle de tráfego.

Especificamente, nas seções iniciais será abordado o protocolo TCP. Em seguida serão apresentadas e detalhadas as categorias de serviço ABR e GFR, ressaltando os diversos algoritmos de controle empregados pelo ABR, os mecanismos utilizados na implementação dos serviços GFR e a implementação desta categoria utilizando-se um mecanismo de controle ABR. Na seqüência será apresentada a proposta de utilização do controle de tráfego ATM, através das categorias GFR e ABR, na minimização da variação de banda passante disponível para aplicações TCP/IP sobre uma rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL.

Por fim, serão apresentadas as conclusões relacionadas com o uso do protocolo TCP e do controle de tráfego ATM no enlace ATM sobre ADSL.

3.2. PROTOCOLO TCP

Na arquitetura TCP/IP, o protocolo TCP realiza um serviço de transporte confiável de dados, através da realização de funções como o controle de fluxo, o controle de erros e a confirmação do recebimento de pacotes.

Do ponto de vista das aplicações, o serviço oferecido pelo protocolo TCP possui algumas características que merecem destaque:

- **Orientação à conexão:** o TCP é um protocolo orientado a conexão, uma vez que é necessário a solicitação de uma conexão com o destino antes que se promova a transferência de informações.
- **Comunicação fim a fim:** a conexão TCP é estabelecida entre pares de processos residentes em máquinas distintas (*hosts*).
- **Confiabilidade:** o TCP garante que os dados enviados através de uma conexão serão entregues livres de erros, sem perdas e na seqüência de envio.

- Conexões *full duplex*: as conexões TCP permitem a transferência de dados em ambas as direções simultaneamente.

3.2.1. Controle de Fluxo TCP

Da mesma forma que outros protocolos que realizam controle de fluxo, o TCP utiliza um mecanismo de janelas deslizantes, contudo, tal mecanismo difere daqueles utilizados por outros protocolos em função da separação da confirmação do recebimento de unidades de dados (ACK - *Acknowledgement*), da permissão para o envio de unidades de dados adicionais.

O mecanismo de controle empregado pelo TCP é denominado alocação dinâmica de créditos [38]. Neste mecanismo cada octeto de dados que é transmitido possui um número de sequência (SN - *Sequence Number*). Quando uma entidade TCP envia um segmento, ela inclui o SN do primeiro octeto no campo de dados do referido segmento. Para que seja incrementado o número de segmentos que podem ser enviados, transmite-se uma janela W com o número de créditos permitidos. A figura 3.1 ilustra o mecanismo de alocação de créditos.

Considerando-se o fluxo de dados em apenas uma direção e assumindo que 200 octetos de dados são enviados em cada segmento, inicialmente, durante o processo de estabelecimento da conexão, o número de sequência do transmissor e do receptor são sincronizados, sendo repassado à entidade TCP A uma alocação de créditos inicial de 1400 octetos, começando pelo octeto de número 1001. Após enviar 600 octetos em três segmentos, A reduz sua janela de transmissão para 800 octetos, numerados de 1601 a 2400. A seguir, B confirma o recebimento de todos os octetos até o octeto de número 1601 e emite um crédito de 1000 octetos, significando que A pode enviar os octetos de 1601 a 2600, ou seja, cinco segmentos. Entretanto, quando as mensagens enviadas por B chegam em A , este já enviou dois segmentos contendo os octetos de 1601 a 2000, os quais foram permitidos na alocação

inicial, restando, portanto, neste instante em *A*, créditos correspondentes a 400 octetos (dois segmentos). Logo, *A* avança o limite inferior da sua janela toda vez que processa uma transmissão e avança o limite superior apenas quando lhe são fornecidos créditos adicionais.

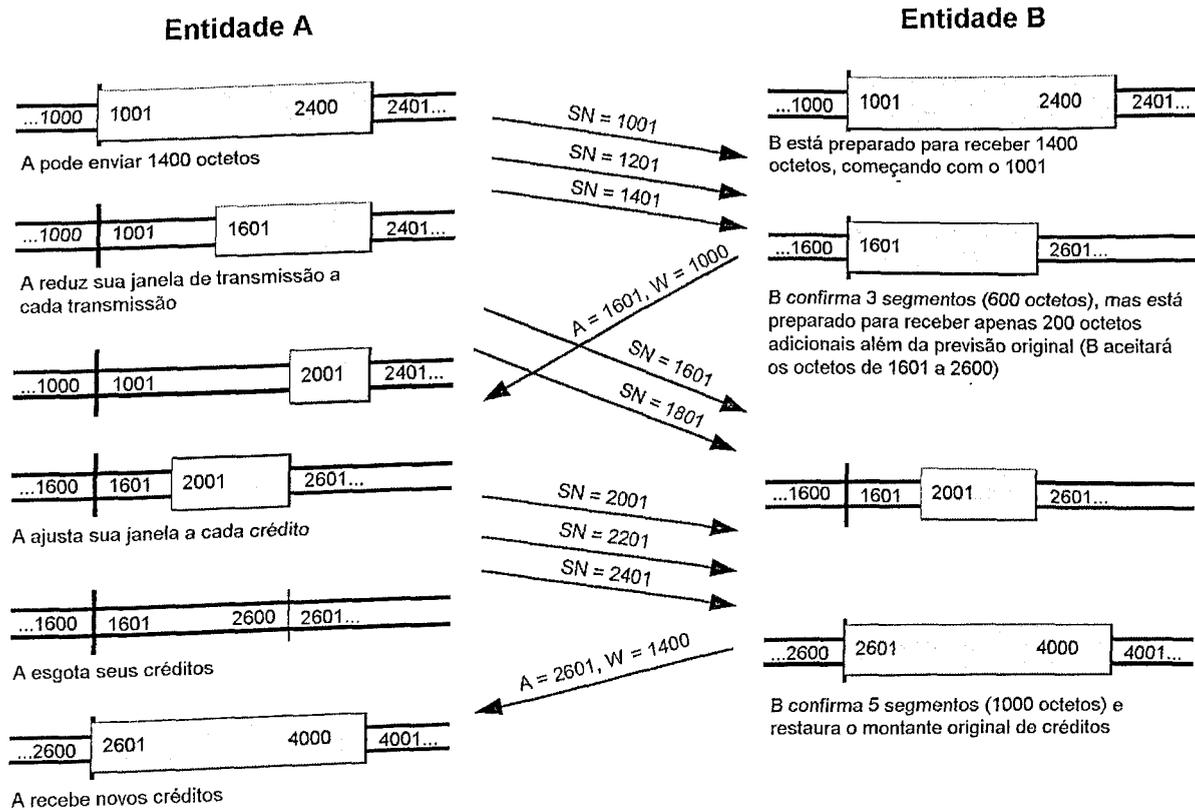


Figura 3.1. Mecanismo de Alocação de Créditos TCP.

A figura 3.2 mostra o mecanismo de alocação de créditos do ponto de vista do transmissor e do receptor.

Vale ressaltar que, embora o mecanismo de alocação de créditos seja extremamente flexível, algumas medidas devem ser adotadas no sentido de que apenas sejam permitidos novos segmentos até o limite especificado pela disponibilidade de espaço nos *buffers* dos receptores [38].

Como os segmentos TCP enviados através de uma conexão possuem tamanhos variáveis, os TEs associados às extremidades da conexão necessitam estabelecer o tamanho

máximo para os segmentos (MSS - *Maximum Segment Size*) que irão transmitir. O processo de negociação para a determinação do MSS ocorre durante a fase de estabelecimento da conexão. Caso um dos TEs não se pronuncie a respeito do valor para o MSS, o valor *default* de 536 *bytes* é assumido [39].

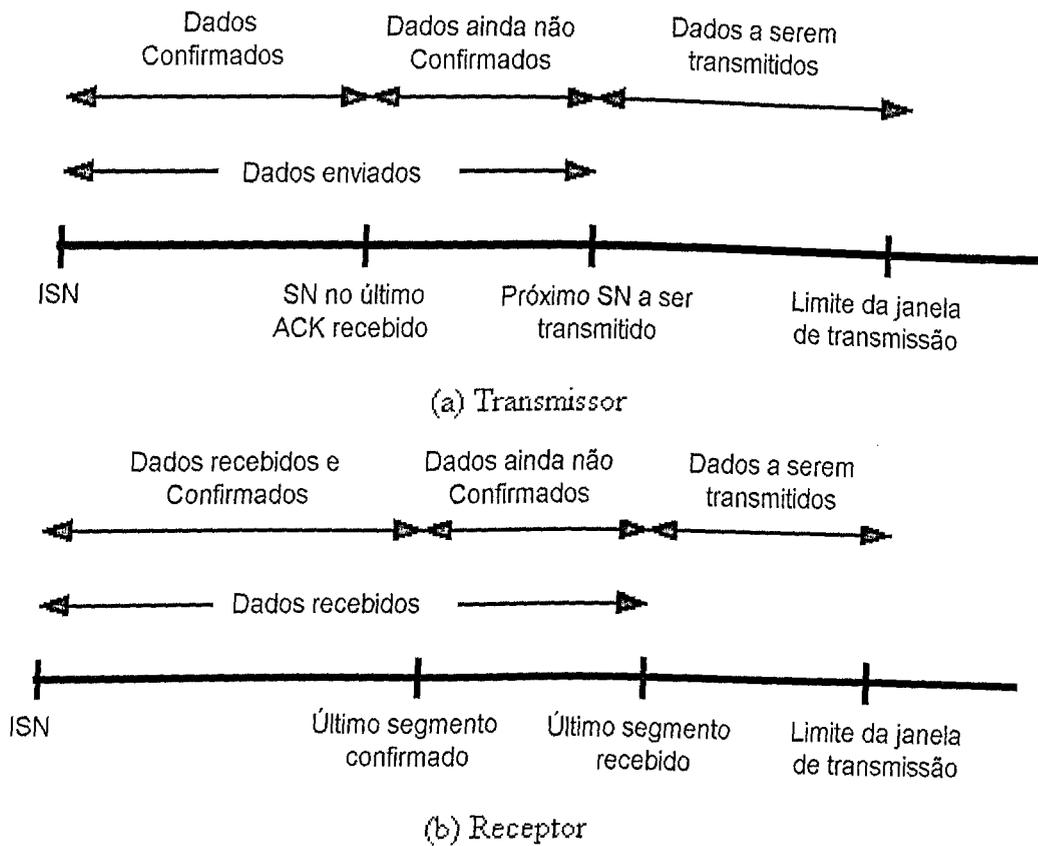


Figura 3.2. Mecanismo de Alocação de Créditos do Ponto de Vista do Transmissor e do Receptor.

3.2.1.1. Estratégia de Retransmissão

Diferentemente de outros protocolos que realizam controle de fluxo, o TCP realiza exclusivamente uma confirmação com retransmissão, quando um reconhecimento (ACK) não chega ao seu destino em dado período de tempo (*timeout*). Logo, um ponto de vital

importância no desempenho do TCP é o valor deste *timeout*. Caso este valor seja muito pequeno, ocorrerão muitas retransmissões desnecessárias de segmentos, comprometendo a vazão nas estações da rede. Por outro lado, se o valor do *timeout* for muito grande, o protocolo será muito lento na resposta à perda de um segmento, comprometendo o retardo de transferência. O *timeout* deve ser estabelecido em um valor um pouco maior que o intervalo de tempo entre a transmissão de um segmento e o recebimento de seu ACK, ou RTT (*Round Trip Time*). Vale ressaltar que o RTT é variável mesmo em condições de tráfego constante na rede [38].

Em função da importância da determinação do RTT, duas estratégias são sugeridas com este propósito. A primeira delas utiliza um valor fixo para o *timeout*, baseado no comportamento típico da rede. Tal estratégia é incapaz de responder às alterações nas condições de tráfego da referida rede. A segunda estratégia utiliza um esquema de retransmissão adaptativa, o qual visa estabelecer o *timeout* em função das mencionadas alterações do tráfego na rede. Este esquema é abordado na próxima seção.

3.2.1.2. Retransmissão Adaptativa

Considerando-se que o intervalo de tempo até o recebimento de um ACK varia em função do atraso experimentado pelos segmentos durante a transmissão entre fonte e destino, o qual é resultado do armazenamento dos segmentos em *buffers* dos múltiplos roteadores intermediários existentes no referido caminho entre fonte e destino, o esquema de retransmissão adaptativa visa a determinação do RTT de forma dinâmica, ou seja, em função de alterações das condições de tráfego na rede [40].

No esquema de retransmissão adaptativa, o RTT calculado a cada instante é tratado como uma amostra do referido intervalo de tempo (*sample round trip time*), sendo utilizado

no cálculo do RTT médio para a conexão. A equação 3.1 é utilizada para este cálculo. Vale ressaltar que o RTT resultante é denominado RTT estimado [40].

$$\text{RTT_estimado} = \alpha * \text{RTT_antigo} + (1 - \alpha) * \text{Nova_amostra} \quad (3.1)$$

Na equação 3.1, α é uma constante ponderada que varia entre 0 e 1. Para valores de α próximos de um, o RTT estimado consiste basicamente do RTT antigo.

O valor do RTT estimado é utilizado no cálculo do *timeout* de retransmissão (RTO - *Retransmission TimeOut*), quando pacotes TCP são enviados. A equação 3.2 representa este cálculo.

$$\text{RTO} = \beta * \text{RTT_estimado} \quad (3.2)$$

Nesta equação, valores próximos de um para o fator de variação de atraso β ($\beta > 1$) implicarão em uma proximidade entre os valores do RTO e do RTT estimado. Neste caso, o TCP será capaz de detectar rapidamente a perda de um segmento, reduzindo consideravelmente o intervalo de tempo até a sua retransmissão, o que melhorará a vazão da conexão. Por outro lado, se o ACK estiver apenas atrasado, não caracterizando a perda do segmento, o TCP retransmitirá desnecessariamente um segmento. A especificação original recomenda que o fator β tenha o valor igual a dois [39, 40].

3.2.1.3. Ambigüidade de Confirmação

Embora seja relativamente fácil a medida do RTT, ambigüidades podem ocorrer em algumas situações.

Assumindo-se que a entidade TCP mantenha uma tabela do intervalo de tempo que os segmentos levam para serem confirmados e que estabeleça o instante de retransmissão em função da média observada para estes valores, existe a possibilidade de que o referido instante não esteja correto. Um exemplo típico do problema é o caso em que um segmento foi retransmitido. Considerando-se que o transmissor não tem como reconhecer se o ACK recebido é uma resposta à transmissão original ou à retransmissão, denomina-se tal fenômeno de ambigüidade de retransmissão [38].

Caso o transmissor assuma que a confirmação é para a transmissão original quando realmente não é, a estimativa para o RTT será muito maior do que seu real valor. Assumindo que a confirmação é para a retransmissão caso realmente não seja, a estimativa para o RTT será muito menor do que o seu real valor e conseqüentemente o RTO também será menor. Isto ocasionará a realização de retransmissões que não são realmente necessárias. Portanto, associar a confirmação à transmissão original ou à retransmissão produzirá incorretas estimativas para o RTT.

Para solucionar este problema foi criado um algoritmo que atualiza a estimativa para o RTT utilizando apenas a transmissão original, ou seja, neste algoritmo, chamado de algoritmo de *Karn*, o RTT não será atualizado após o recebimento de um ACK de uma retransmissão [41].

Obviamente esta implementação do algoritmo de *Karn* pode também levar a falhas. Considerando-se o envio de um segmento após um acentuado aumento no RTT, o TCP calcula um *timeout* usando a amostra de RTT existente. Neste caso, o *timeout* será muito pequeno para o novo RTT, o que forçará uma retransmissão. Caso o TCP ignore as configurações originárias dos segmentos retransmitidos, ele nunca atualizará o cálculo e o ciclo continuará.

Visando solucionar este novo problema, o algoritmo de *Karn* combina aos RTOs uma estratégia de reinício (*backoff*) para o *timer* que é responsável pela medida do *timeout* [39]. A técnica de *backoff* calcula um RTO inicial aplicando a equação 3.2. Entretanto, se o *timer* expirar e provocar uma retransmissão, o TCP incrementará o RTO, ou seja, cada vez que for retransmitido um segmento, o TCP aumentará o RTO.

Para a implementação da técnica de *backoff* é utilizada a equação 3.3, onde está presente um fator multiplicativo γ , o qual geralmente possui um valor igual a 2.

$$\text{Novo_RTO} = \gamma * \text{Antigo_RTO} \quad (3.3)$$

De maneira geral, o algoritmo de *Karn* utiliza a amostra de RTT existente para calcular um valor inicial de RTO, mas em seguida promove um *backoff* do RTO de cada transmissão até que possa transferir um segmento com êxito. Quando ele envia segmentos subsequentes, mantém o valor de RTO que resulta do *backoff*. Finalmente, quando chega a confirmação correspondente a um segmento que não exigiu retransmissão, o TCP estima o RTT e recupera o RTO adequadamente. Vale ressaltar que, o algoritmo de *Karn* apresenta bons resultados, mesmo em redes com alto nível de perda de segmentos.

3.2.1.4. Alta Variância no Retardo de Transmissão

O padrão original TCP [40] especificou técnicas, como as descritas nas seções anteriores, para a estimativa do RTT. Porém, a utilização do fator de variação do atraso β igual a dois não é apropriado para redes que apresentem variações no atraso de transferência. Neste caso, é necessário o cálculo da média e da variância do RTT estimado, uma vez que a variância calculada deverá ser utilizada no lugar do fator β .

Para tanto, as equações a seguir deverão ser utilizadas.

$$\begin{aligned}
 DIF &= Amostra_RTT - RTT_antigo \\
 RTT_aprimorado &= RTT_Antigo + \delta * DIF \\
 DEV &= DEV_antigo + \rho (|DIF| - DEV_antigo) \\
 RTO &= RTT_aprimorado + \eta * DEV
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

onde, DEV é o menor desvio estimado, δ é uma fração entre zero e um que controla quão rápido as novas amostras afetam a média ponderada, ρ é uma fração entre 0 e 1 que controla quão rápido novas amostras afetam o menor desvio e η é um fator que controla o quanto o desvio afeta o RTO [41].

3.2.1.5. Reação ao Congestionamento

Considerando-se um tráfego intenso na rede, os roteadores intermediários não são capazes de armazenar todos os pacotes que chegam até eles. Como resultado desta situação, estes roteadores passam ao estado de congestionamento e começam a descartar pacotes até que seus *buffers* apresentem disponibilidade de espaço.

Geralmente os *hosts* ou TEs não sabem os detalhes de onde o congestionamento ocorreu e qual a sua causa, logo, para eles o congestionamento significa apenas um aumento no atraso de transferência. Tendo em vista a utilização da técnica de confirmação com retransmissão, a reação ao atraso é realizada através de retransmissões, o que agrava ainda mais o estado de congestionamento. Caso o aumento de tráfego provocado pelas retransmissões não seja detectado, será também produzido um aumento de atraso, que por sua vez produzirá uma elevação ainda maior no tráfego, e assim por diante. Esta condição é conhecida como colapso de congestionamento, e pode provocar a paralisação da rede.

Para evitar o colapso de congestionamento, o TCP precisa reduzir as taxas de transmissão quando for detectado um estado de congestionamento, ou seja, sempre que forem

detectados atrasos. Vale ressaltar que, os algoritmos criados para evitar congestionamentos devem considerar as variações nos atrasos de ida e volta.

Um dos algoritmos utilizados pelo TCP para evitar congestionamentos é chamado *slow start*. Através deste algoritmo a taxa na qual novos pacotes são injetados na rede é a mesma na qual os ACKs são recebidos [42].

O mecanismo *slow start* utiliza uma janela chamada de CWND (*Congestion Window*) ou janela de congestionamento. Quando uma nova conexão é estabelecida com um *host*, a CWND é inicializada para um segmento. A cada ACK recebido, ela é incrementada em um segmento. O transmissor pode enviar segmentos até o limite especificado pela CWND e pelo notificador de janela [42]. A equação 3.5 ilustra este limite.

$$Janela_Permitida = \text{Min}(\text{notificador_de_janela}, CWND) \quad (3.5)$$

A CWND corresponde ao controle de fluxo imposto pelo transmissor, sendo relacionada com a avaliação do estado de congestionamento da rede, enquanto o notificador de janela corresponde ao controle de fluxo imposto pelo receptor, sendo relacionado com a disponibilidade de *buffer* no receptor.

Ainda com relação à CWND, vale ressaltar que seu crescimento não é totalmente exponencial devido às variações no recebimento dos ACKs [42].

Na prática quando ocorre um congestionamento, o TCP utiliza em conjunto com o *slow start* um outro algoritmo chamado *congestion avoidance*. Juntos estes dois algoritmos reduzem a taxa de transmissão e conseqüentemente o estado de congestionamento da rede.

Para que os algoritmos *slow start* e *congestion avoidance* operem, o TCP requer o estabelecimento de duas variáveis para cada conexão: a CWND e o SSTHRESH (*Slow Start Threshold Size*) [42]. A operação conjunta destes algoritmos é descrita a seguir.

- 1) A CWND é inicializada em um segmento e o Ssthresh é inicializado em 65.535 bytes.
- 2) O TCP sempre respeita o limite imposto pelo tamanho de janela_permitida (equação 3.5) em suas transmissões.
- 3) Quando o TCP detecta um congestionamento através de duplicatas de ACKs ou *timeout*, o valor do Ssthresh é alterado para metade do valor da janela_permitida. Isto reduz consideravelmente o tráfego na rede. Caso o congestionamento continue, o TCP continuará a redução do tráfego na rede exponencialmente até que a janela_permitida tenha seu valor alterado para um segmento. Se o congestionamento for devido a atrasos na rede (ocorrência de *timeout*), o TCP também alterará o valor da CWND para um segmento (*slow start*).
- 4) Quando se encerra o estado de congestionamento, o TCP incrementa a injeção de segmentos na rede. Para cada ACK recebido, a CWND será incrementada. Esta alteração depende do algoritmo que o TCP está executando.
 - se a CWND for maior que o Ssthresh, o TCP está na fase de *congestion avoidance*. Nesta fase a CWND é incrementada em $1/CWND$ a cada ACK recebido ou no máximo em um segmento a cada RTT, sem considerar o número de ACKs recebidos.
 - se a CWND é menor ou igual o Ssthresh, a CWND é incrementada em um segmento a cada ACK recebido. Isto significa que a CWND crescerá exponencialmente até alcançar o Ssthresh, entrando na fase de *congestion avoidance*.

A figura 3.3 ilustra a operação conjunta dos algoritmos *slow start* e *congestion avoidance* através de um exemplo. Inicialmente, estabeleceu-se o valor de *SSTHRESH* em 8.

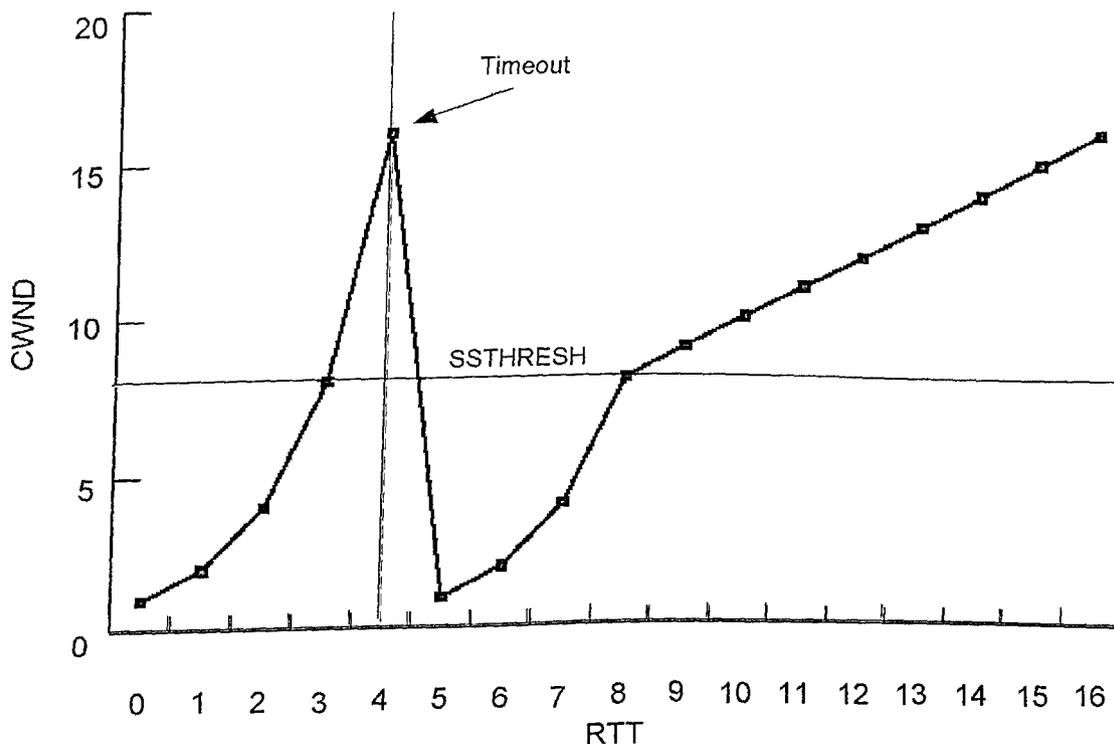


Figura 3.3. *Slow Start e Congestion Avoidance.*

Nota-se que até que este limite seja alcançado ($CWND = SSTHRESH$) o crescimento da CWND é exponencial, caracterizando o emprego do algoritmo *slow start*. Nesta fase a CWND é incrementada em um segmento a cada ACK recebido. Após o referido limite ($CWND > SSTHRESH$) a CWND é incrementada em um segmento a cada RTT, ou seja, seu crescimento é agora linear. Ocorrido um *timeout*, o valor da CWND será reduzido para um segmento. A partir deste instante reinicia-se o algoritmo *slow start*, até que seja novamente atingido o *SSTHRESH*, quando inicia-se o algoritmo *congestion avoidance*. Percebe-se que foram necessários onze RTTs até que a CWND recuperasse o nível em que se encontrava no momento do *timeout*.

3.2.1.6. Algoritmos *Fast Retransmit* e *Fast Recovery*

Quando o TCP recebe um segmento fora de seqüência, ele imediatamente envia uma duplicata de ACK ao transmissor. Desta forma, o transmissor é informado do número de seqüência do próximo segmento esperado e que um segmento fora de seqüência foi recebido [39].

Tendo em vista que o TCP não tem como saber se o segmento ausente da seqüência foi perdido ou apenas está atrasado, ele aguarda o recebimento de um pequeno número de duplicatas de ACKs. Caso o segmento esteja apenas atrasado, após o recebimento de uma ou duas duplicatas de ACKs o segmento será recebido, o que gerará um novo ACK. Não acontecendo isto, mais duplicatas de ACK serão recebidas, o que pode ser considerado como um forte indicativo de que o segmento foi perdido. Neste caso, após o recebimento de três duplicatas de ACK, o TCP retransmite o segmento mesmo que o *timer* para o referido segmento não tenha expirado. Este algoritmo é conhecido como *Fast Retransmit* [42, 39].

Após a execução do algoritmo *Fast Retransmit*, o TCP deve iniciar a execução do algoritmo *slow start*, o que implicará em redução considerável da vazão do TCP, pois o *slow start* reduzirá de forma abrupta o fluxo dos segmentos que estão trafegando entre os TEs. Visando evitar este problema, o TCP executa o algoritmo conhecido como *Fast Recovery*, o qual evita que seja executado o algoritmo *slow start* após a retransmissão do segmento considerado perdido. Utilizando o algoritmo *Fast Recovery*, o TCP após a referida retransmissão executa o algoritmo *congestion avoidance*.

O TCP possui diversos protocolos que executam as funções descritas pelos algoritmos *Slow Start*, *Congestion Avoidance*, *Fast Retransmit* e *Fast Recovery* [39].

O protocolo que executa os algoritmos *Slow Start* e *Congestion Avoidance* é conhecido como TCP Padrão ou TCP *Vanilla*, enquanto o protocolo que executa estes

algoritmos e também o algoritmo *Fast Retransmit* é chamado TCP *Tahoe*. Já o protocolo que executa os quatro algoritmos anteriormente mencionados é conhecido como TCP *Reno*.

A utilização destes protocolos atribui confiabilidade e eficiência ao serviço de transporte realizado pelo TCP.

3.3. CONTROLE DE TRÁFEGO ATM

O controle de tráfego ATM, realizado pelas categorias de serviço ABR e GFR, foi criado com o objetivo de atribuir um determinado nível de garantia aos tráfegos que apresentem comportamento surtivo e imprevisível. Este comportamento promove em muitos casos uma elevada utilização da banda passante disponível na rede, o que pode provocar atrasos e sobrecarga dos *buffers*, resultando na perda de dados.

3.3.1. Controle Realizado pela Categoria de Serviço ABR

ABR é uma categoria de serviço que controla a taxa de emissão de células de cada VC (*Virtual Channel*) com base em informações a respeito das condições da rede. Tais informações são transportadas através de células especiais denominadas células RM (*Resource Management Cells*), as quais são intercaladas pelo TE fonte, entre as células de dados [43]. A taxa de transmissão permitida, ou ACR (*Allowed Cell Rate*) ao TE fonte é atualizada utilizando-se as informações contidas nas células RM. Para a realização do controle ABR, dois tipos de *switches* ATM podem ser utilizados, o *binary-mode* e o *ER-mode*. A técnica de controle utilizada pelo *switch binary-mode* é denominada *ABR-Binary* e a técnica utilizada pelo *switch ER-mode* é denominada *ABR-ER* [10].

O controle de fluxo ABR é realizado entre um TE fonte e um TE destino. Estes TEs são conectados através de conexões bidirecionais. Considerando o fluxo de informações entre o TE fonte e o TE destino, bem como o fluxo de células RM a ele associado, o sentido entre

fonte e destino é chamado *forward* e o sentido contrário é conhecido como *backward*. A figura 3.4 ilustra um *loop* de controle que consiste de duas células RM, cada qual trafegando em um sentido [3].

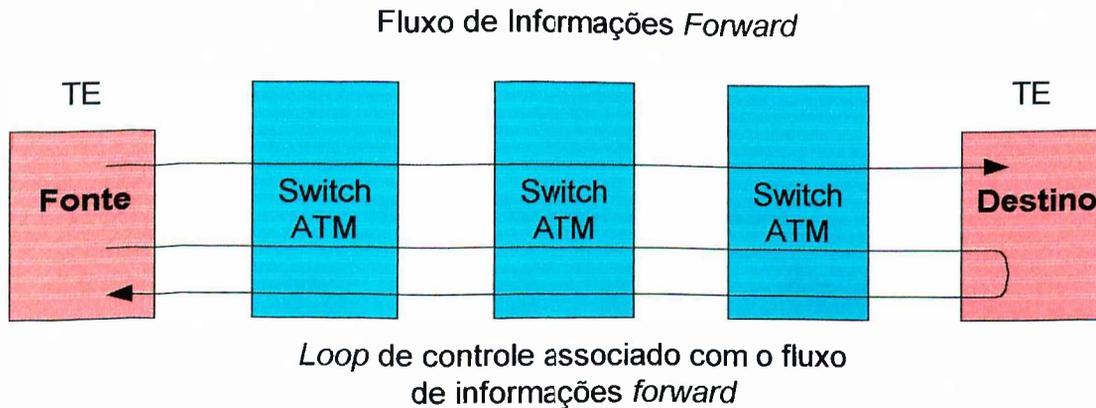


Figura 3.4. *Loop* de Controle ABR.

O TE fonte gera uma célula RM *forward* (FRM) e a envia ao TE destino. O referido TE destino envia esta célula RM de volta ao TE fonte como uma célula RM *backward* (BRM), a qual transporta as informações a respeito das condições da rede. Estas informações são fornecidas pelos elementos de rede, como por exemplo, os *switches* ATM. Os elementos de rede podem inserir as informações diretamente nas células RM quando elas passam por eles nos sentidos *forward* ou *backward*, ou indiretamente através da marcação do bit EFCI no cabeçalho das células de dados que trafegam no sentido *forward*. Neste caso, o TE destino atualizará as células RM baseado nas informações a respeito do estado de congestionamento na rede. Por fim, os elementos de rede podem também gerar células BRM [3].

3.3.1.1. Técnica de Fontes e Destinos Virtuais (VS/VD)

A técnica VS/VD (*Virtual Source/Virtual Destination*) divide o *loop* de controle ABR em pequenos segmentos, como mostra a figura 3.5. Fontes virtuais e destinos virtuais são estabelecidos ao longo da rota das conexões ABR, dividindo estas conexões em segmentos

controlados separadamente. Cada VS imita o comportamento de um TE fonte e cada VD imita o comportamento de um TE destino, ou seja, células BRM recebidas por uma VS são removidas da conexão e células FRM recebidas por uma VD são enviadas de volta à fonte virtual ou ao TE fonte, não sendo transmitida ao próximo segmento de controle da conexão [3].

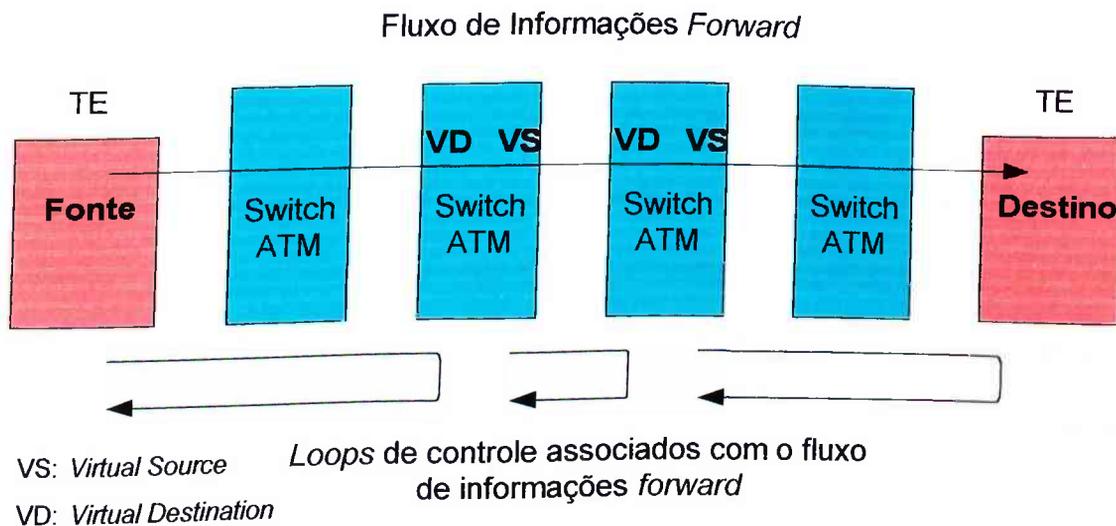


Figura 3.5. Técnica VS/VD.

A utilização da técnica VS/VD permite a redução do atraso nas transmissões provocado pelo *loop* de controle ABR. Conseqüentemente é alcançado um melhor desempenho nas transmissões que utilizam a referida técnica.

3.3.1.2. Técnica *ABR-Binary*

A técnica *ABR-Binary* utiliza a informação a respeito do estado de congestionamento da rede, contida no bit CI das células RM para a implementação de um protocolo que adaptativamente reduza a *ACR* e conseqüentemente a taxa de emissão de células durante um

congestionamento. O referido estado de congestionamento é detectado através do número de células armazenadas nos *buffers* dos *switches* ATM.

De forma mais específica, durante o estabelecimento de uma conexão, as fontes ABR negociam diversos parâmetros de operação com a rede, entre os quais os parâmetros *PCR* (*Peak Cell Rate*) e *MCR* (*Minimum Cell Rate*). O parâmetro *PCR* especifica a máxima taxa na qual as fontes podem transmitir em cada canal virtual (VC), e o parâmetro *MCR* especifica a taxa mínima garantida. Durante o estágio de transmissão, a *ACR* é dinamicamente alterada entre a *MCR* e a *PCR*. Vale ressaltar que no instante de estabelecimento da conexão e também após longos períodos de inatividade na conexão, a *ACR* é estabelecida para o mesmo valor do parâmetro *ICR* (*Initial Cell Rate*). Por fim, são também especificados durante a fase de estabelecimento da conexão, os parâmetros *RIF* (*Rate Increase Factor*) e *RDF* (*Rate Decrease Factor*), os quais controlam respectivamente o acréscimo e o decréscimo na taxa de transmissão de células [10]. A tabela 3.1 ilustra a atualização da *ACR*.

Tabela 3.1. Atualização da *ACR*.

NI	CI	Ação
0	0	$ACR \leftarrow \max[MCR, \min(ER, PCR, ACR + RIF * PCR)]$
0	1	$ACR \leftarrow \max[MCR, \min(ER, ACR(1 - RDF))]$
1	0	$ACR \leftarrow \max[MCR, \min(ER, ACR)]$
1	1	$ACR \leftarrow \max[MCR, \min(ER, ACR(1 - RDF))]$

3.3.1.3. Técnica ABR-ER

Na técnica ABR-ER, os *switches* ATM indicam de forma explícita a taxa na qual os TEs fontes podem transmitir as células *ER* (*Explicit Rate*). Para tanto, diversos algoritmos de

controle podem ser utilizados, tais como, o ERICA (*Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance*) e o EPRCA (*Enhanced Proportional Rate Control Algorithm*). A adoção destes algoritmos permite o combate a problemas como o descarte de células, o qual está associado ao atraso experimentado pelas células durante a permanência nos *buffers*, o qual é conhecido como atraso de enfileiramento (*Queuing Delay*).

Algoritmo ERICA

O algoritmo ERICA foi projetado com a preocupação de garantir uma justa e eficiente alocação da banda passante disponível (*Fair_Share*) para todas as fontes que competem entre si durante uma transmissão [16]. Como um algoritmo de controle ele requer o constante monitoramento dos recursos disponíveis na rede (banda passante e espaço nos *buffers*), bem como da demanda por estes recursos. Tendo em vista a predominância do enfileiramento de saída nos *switches* ATM, o algoritmo ERICA é aplicado a cada uma das portas de saída dos *switches*, como descrito a seguir.

O *switch* ATM periodicamente monitora a carga de tráfego em cada enlace e determina o fator de carga (Z), a capacidade de transmissão disponível e o número de VCs ativos (N). O fator de carga é calculado como a medida da razão da taxa de emissão de uma determinada porta pela capacidade do enlace de saída.

$$Z = \frac{\text{Taxa}_{\text{emissão}}_{\text{ABR}}}{\text{Capacidade}_{\text{ABR}}} \quad (3.6)$$

onde, $\text{Capacidade}_{\text{ABR}} = \text{Taxa}_{\text{utilização}}(U) * \text{Banda}_{\text{passante}}_{\text{disponível}}$

A taxa de emissão ABR é medida sobre um intervalo de tempo chamado de intervalo médio do *switch*. Os cálculos acima são executados ao final do referido intervalo.

A taxa de utilização ideal (U) específica o montante de capacidade disponível no enlace. Valores típicos para esta taxa estão próximos de 100%, tipicamente entre 90% e 95% [16].

Já o fator de carga é um indicador do nível de congestionamento do enlace. Valores muito altos para este parâmetro são indesejáveis, pois indicam um elevado estado de congestionamento no enlace, e valores muito baixos indicam uma baixa taxa de emissão de células. O valor ideal para este parâmetro é igual a um, já que o objetivo do controle é manter o máximo nível de ocupação da rede, sem contudo apresentar congestionamentos.

Visando alcançar a justa distribuição da banda passante disponível é necessário o cálculo do parâmetro *Fair_Share*.

$$Fair_Share = \frac{Capacidade_ABR}{Número_VCs_ativos} \quad (3.7)$$

Caso um VC não esteja utilizando todos os recursos que estão disponíveis a ele, o *switch* ATM redistribuirá de forma justa entre os demais VCs, os recursos não utilizados. Para tanto, o *switch* calculará o parâmetro *VCShare*.

$$VCShare = \frac{CCR(Current\ Cell\ Rate)}{Z} \quad (3.8)$$

Caso todos os VCs alterem suas taxas de emissão para a taxa especificada pelo parâmetro *VCShare*, o *switch* ATM experimentará a situação de carga ideal na rede ($Z = 1$). Desta forma, o parâmetro *VCShare* tem por objetivo levar o sistema a operar em um ponto de máxima eficiência, o que necessariamente não significa que haja total justiça na distribuição

dos recursos do sistema. Vale ressaltar que, a utilização isolada do parâmetro *Fair_Share* não garante eficiência na operação do sistema no que diz respeito à vazão alcançada.

Com o objetivo de alcançar a máxima eficiência na transmissão de informações, associada à justiça na distribuição da banda passante disponível, combinou-se os parâmetros *Fair_Share* e *VCShare*. A equação 3.9 ilustra esta combinação.

$$ER = Máx(Fair_Share, VCShare) \quad (3.9)$$

Para garantir um nível de justiça mínimo entre os VCs, as fontes ABR enviam dados no mínimo à taxa especificada pelo parâmetro *Fair_Share* no primeiro intervalo de ida e volta (*round trip*). Se o valor do parâmetro *VCShare* é maior que o valor do parâmetro *Fair_Share*, as fontes passam a enviar dados na taxa especificada pelo *VCShare*, o que garante um adequado nível de utilização do enlace, ou seja, o mais próximo possível de 100%.

Tendo em vista que o valor da *ER* calculado utilizando-se a equação 3.9 não pode ser maior que a capacidade ABR, a *ER* deve respeitar também a seguinte equação:

$$ER = Min(ER_Antigo, Capacidade_ABR) \quad (3.10)$$

Para garantir que a *ER* calculada na porta de saída do *switch* ATM especifique uma taxa que permita aos dados alcançarem seus destinos, cada *switch* calcula a *ER* mínima como sendo o resultado da equação 3.11.

$$ER_{RM} = Min(ER_{RM}, ER) \quad (3.11)$$

Percebe-se que *ER_{RM}* corresponde ao valor da *ER* especificado no campo *ER* das células RM.

Visando melhorar a eficiência do algoritmo básico apresentado anteriormente, em termos do controle por ele realizado, algumas inovações foram propostas e anexadas ao referido algoritmo.

A primeira delas adiciona uma variável chamada *MaxAllocPrevious*, que armazena a máxima capacidade de alocação durante o intervalo médio preliminar de processamento do *switch* e uma outra variável chamada *MaxAllocCurrent*, que acumula a capacidade máxima de alocação durante o atual intervalo médio de processamento do *switch*. Desta forma, a *ER* passa a ser calculada como $\text{Max}(\text{Fair_Share}, \text{VCShare}, \text{MaxAllocPrevious})$.

Outra inovação adotada visa garantir que a *CCR* (*Cell Current Rate*) utilizada no cálculo da *ER* seja a mais atual possível, ou seja, reflita o mais apropriadamente o estado do enlace. Para tanto, o *switch* ATM copia o campo *CCR* das células FRM e utiliza esta informação para calcular o valor da *ER* a ser inserido nas células BRM.

Considerando-se as oscilações na taxa de emissão de células provocadas pelos diferentes valores do campo *CCR* das células RM, adotou-se o cálculo da *ER* apenas uma vez em cada intervalo médio do *switch*. Este valor de *ER* é armazenado e inserido em todas as células RM dentro de um mesmo intervalo médio.

Como mencionado anteriormente, o valor da *CCR* deve refletir o estado atual do enlace, desta forma assume-se que a *CCR* está correlacionada com o fator de carga medido. Quando a *CCR* é baixa, a frequência de envio das células FRM torna-se muito baixa. Assim, o *switch* ATM não pode ter uma nova estimativa para o valor da *CCR* durante um determinado número de intervalos médios, o que conseqüentemente comprometerá o cálculo da *ACR* dos VCs.

Uma possível solução para o problema da imprecisão no valor da *CCR*, requer que o *switch* ATM determine o número de células recebidas por cada VC durante cada intervalo médio de processamento e atualize a *CCR* como segue:

- Ao término de um intervalo médio de processamento do *switch*

$$\text{CCR [VC]} = \text{Número de células [VC]} / \text{comprimento do intervalo}$$

$$\text{Número de células [VC]} = 0$$
- Quando uma célula é recebida

$$\text{Número de células [VC]} = \text{Número de células [VC]} + 1$$
- Na inicialização
 para todos os VCs \Rightarrow Número de células [VC] = 0
- Quando uma célula FRM é recebida, o seu campo CCR não é copiado para o campo CCR [VC]

Percebe-se que usando este método, o *switch* ignora o campo CCR das células RM.

Desta forma, o erro na estimativa da CCR é minimizado.

Algoritmo ERICA+

O algoritmo ERICA depende, para realização de seu controle, de parâmetros como o fator de carga (Z) e o número de VCs ativos. Caso estes parâmetros estejam errados e a taxa de utilização possuir um alto valor, o algoritmo ERICA pode divergir, ou seja, as filas nos *buffers* dos *switches* podem tornar-se ilimitadas e a capacidade alocada para a redução destas filas se torna insuficiente. Uma solução para este problema é estabelecer a taxa de utilização do enlace para um pequeno valor, permitindo que a capacidade de redução das filas seja incrementada. De qualquer forma, a taxa de utilização do enlace, quando ele não está sobrecarregado, é reduzida em função da redução do parâmetro taxa de utilização (U).

Outra opção para a solução do problema da divergência do algoritmo ERICA é o estabelecimento de um limite para o tamanho das filas de células nos *buffers*, o qual será empregado como referência para a redução da taxa de utilização do enlace. Desta forma será possível a manutenção de uma adequada taxa de utilização, quando o nível de ocupação das

filas for pequeno e também uma rápida redução destas filas, quando o nível de ocupação das mesmas aumentar de tamanho.

A utilização do comprimento das filas nos *buffers* dos *switches* ATM como uma medida secundária (a taxa de emissão de células é a medida primária) é conhecida como algoritmo ERICA+ [16]. Tal algoritmo tem por objetivo a obtenção de uma taxa de utilização do enlace igual a 100 %, porém apresentado um determinado atraso de enfileiramento.

Especificamente, quando o atraso de enfileiramento é reduzido abaixo de seu valor ideal ($T0$ - *Target Queuing Delay*), será permitido ao algoritmo ERICA+ incrementar a alocação de VCs visando-se alcançar o referido valor ideal de atraso. Similarmente, quando o atraso de enfileiramento supera o valor $T0$, a alocação de VCs será reduzida disponibilizando-se a capacidade adicional para a redução das filas. No instante em que o atraso de enfileiramento se igualar a $T0$, 100 % da capacidade ABR estará alocada aos VCs. Assim, no algoritmo ERICA+, o parâmetro $T0$ substitui o parâmetro taxa de utilização desejada (U), empregado no algoritmo ERICA.

No algoritmo ERICA+, a capacidade ABR ideal ($R0$) corresponde a uma fração da capacidade ABR total, sendo esta fração uma função do atraso de enfileiramento (Tq) no *switch*.

$$R0 = f(Tq) * Capacidade_ABR_Total \quad (3.12)$$

Tendo em vista que o controle das filas utiliza o valor do atraso de enfileiramento como referência, dependendo da capacidade disponível no momento, o comprimento idealizado para uma determinada fila é dado por:

$$Q0 = Capacidade_ABR_Total * T0 \quad (3.13)$$

Considerando-se que Q_0 é uma variável dependente da capacidade de transmissão disponível, que por sua vez é dependente da função de controle das filas tem-se:

$$f(Tq) = \frac{a * Q_0}{(a-1) * q + Q_0} \text{ para } q > Q_0$$

e

$$f(Tq) = \frac{b * Q_0}{(b-1) * q + Q_0} \text{ para } 0 \leq q \leq Q_0$$
(3.14)

Percebe-se que $f(Tq)$ é um número entre 1 e 0 no intervalo de Q_0 até o infinito e entre b e 1 no intervalo de 0 até Q_0 .

Esta função é limitada pelo fator QDLF (*Queue Drain Limit Factor*).

$$f(Tq) = \text{Máx}(QDLF, \frac{a * Q_0}{(a-1) * q + Q_0}) \text{ para } q > Q_0$$
(3.15)

Portanto, para cada medida da taxa na qual as células são enviadas ao enlace (*Rate*), a *ER* é calculada de acordo com a equação 3.16 [10].

$$ER = \text{máx}[R_0 / m, R_0 / (Rate * ACR)]$$
(3.16)

onde m é o número de VCs ativos.

Um efeito inoportuno do cálculo da capacidade ABR ideal utilizando-se o produto entre a função $f(Tq)$ e a capacidade ABR é a variação no valor calculado, uma vez que os fatores utilizados no produto são quantidades variáveis (variáveis aleatórias).

Uma forma de reduzir esta variação é utilizar um valor médio para o comprimento da fila (q), ao invés de valores instantâneos. Se o intervalo médio do *switch* for pequeno, o valor

médio para q pode ser obtido através da média do comprimento da fila, obtido no início e no final do intervalo. Caso o intervalo médio seja longo, o ideal é que o valor médio para q seja calculado a partir da média de amostras do comprimento da fila, obtidas durante o referido intervalo.

Uma outra forma de reduzir a variação da capacidade ABR é especificar um valor constante para $Q0$, ao invés de especificar $T0$, desde que o atraso no intervalo $[Q0/Minima_Capacidade_ABR, Q0/Máxima_Capacidade_ABR]$ seja aceitável.

Conhecida a forma de atuação do controle de filas realizado pelo algoritmo ERICA+ é necessário que se apresente detalhadamente os parâmetros $T0$, a , b e $QDLF$, os quais estão diretamente envolvidos com este controle.

- Parâmetros a e b

O parâmetro b determina a quantidade de banda disponível quando o atraso de enfileiramento é nulo. Já o parâmetro a determina a velocidade com que as filas devem ser controladas. Este parâmetro não pode ser muito diferente de b , pois isto provocaria a alocação de diferentes bandas no caso do atraso diferir um pouco de $T0$.

Os parâmetros a e b determinam também a taxa na qual a função $f(Tq)$ reduz o atraso de enfileiramento. Grandes valores para estes parâmetros, fazem com que o sistema se torne extremamente sensível ao referido atraso, enquanto que pequenos valores aumentam o tempo requerido para se alcançar o ponto de operação ideal (atraso de enfileiramento = $T0$).

- Parâmetro $T0$

O atraso de enfileiramento requerido para reduzir a capacidade ABR é diretamente proporcional ao parâmetro $T0$.

O valor máximo para $T0$ depende do tamanho do *buffer* do *switch* ATM, devendo ser estabelecido de forma a permitir que o controle das filas impeça que os *buffers* fiquem sobrecarregados. Este valor máximo pode ser calculado utilizando-se a equação 3.17.

$$T0 = \frac{[(a-1) * QDLF]}{(a - QDLF)} \quad (3.17)$$

Vale ressaltar que, um valor mínimo para o parâmetro $T0$ também deve ser estabelecido visando uma operação estável. Caso $T0$ seja muito pequeno, o comprimento das filas irá variar continuamente, o que pode tornar o sistema instável. Desta forma, para WANs $T0$ deve ser no mínimo uma fração do atraso provocado pelo *round trip time* e, para LANs deve ser no mínimo igual ao referido atraso.

- Parâmetro $QDLF$

O parâmetro $QDLF$ garante que haja banda passante no enlace suficiente para a redução das filas. Para WANs esta capacidade de redução das filas deve ser grande, uma vez que o RTT (*Round Trip Time*) é também grande. Já para LANs, as quais podem receber rapidamente as informações a respeito das condições do enlace e possuem valores pequenos de $T0$, uma grande capacidade de redução não é requerida.

Valores típicos do parâmetro $QDLF$ para WANs e LANs são respectivamente 0,5 e 0,8.

Algoritmo EPRCA

O mecanismo básico do algoritmo EPRCA é baseado no modelo de controle de taxa chamado *positive feedback* [15, 44]. Neste modelo somente é permitido à fonte aumentar a taxa de emissão de células quando há uma indicação explícita de que isto é possível. Caso não

haja a indicação, a taxa de emissão é decrescida continuamente durante a transmissão até atingir a ACR. Tal indicação é feita através das células RM, como descrito na seção 3.3.1.

De forma mais específica, o algoritmo EPRCA utiliza uma variável para manter um resumo das taxas de transmissão de todos os VCs ativos em cada enlace. Esta variável, denominada MACR (*Mean Allowed Cell Rate*), é utilizada como valor de referência para o controle realizado por este algoritmo. A MACR associada com cada enlace deve ser estabelecida de forma que os TEs ABR compartilhem a banda passante disponível. Quando um estado de congestionamento é detectado, a MACR deve ser reduzida em cada VC que apresente uma ACR maior que o seu valor. Neste caso, o valor da taxa de transmissão no campo ER das células BRM será reduzido pelos *switches* ATM, o que acarretará na redução da ACR [13] - [15].

Para a operação do algoritmo EPRCA é necessário o estabelecimento de alguns parâmetros, os quais são apresentados a seguir.

- *Explicit Reduction Factor* (ERF): este parâmetro controla a proporção da MACR que pode ser estabelecida no campo ER das células BRM, quando o enlace está congestionado.
- *VC Separator* (VCS): este parâmetro é usado pelo algoritmo EPRCA para acionar o cálculo da MACR quando o enlace não está congestionado.
- *Average Factor* (AV): este parâmetro é utilizado no cálculo da MACR, correspondendo à média exponencial ponderada dos valores da CCR obtida de cada célula FRM.
- DQT: limite estabelecido pelo algoritmo EPRCA para a detecção de um estado de forte congestionamento.
- *Major Reduction Factor* (MRF): fator utilizado pelo algoritmo EPRCA para reduzir a ER se o enlace está fortemente congestionado.

- *Down Pressure Factor* (DPF): fator utilizado para a redução da ER sob congestionamento moderado, ou seja, quando o nível de ocupação do *buffer* está abaixo do DQT, mas acima do limite pré-estabelecido para a detecção de congestionamentos

O algoritmo apresentado no capítulo 7 (Anexos), descreve a operação de controle realizada pelo algoritmo EPRCA [15].

3.3.2. Controle Realizado pela Categoria de Serviço GFR

Como mencionado no capítulo 2, a categoria de serviço GFR destina-se a aplicações que não sejam em tempo real e a usuários que não podem especificar todos os parâmetros que são necessários numa solicitação por serviços da categoria VBR, ou ainda, a usuários que não possuem TEs que cumpram com as exigências de comportamento solicitadas pelos serviços da categoria ABR. Esta categoria de serviço é capaz de garantir aos VCs uma taxa mínima de transmissão (MCR), cabendo à rede o mapeamento entre este nível e o nível de células [3, 45, 46].

Com o emprego da categoria GFR é possível ainda a utilização da banda passante adicional que é disponibilizada dinamicamente no enlace. Tal banda adicional é igualmente distribuída entre os VCs, ou seja, a alocação de banda para cada VC é realizada com o intuito de se obter uma justa distribuição da referida banda (*fair_share*). Nesta categoria os parâmetros PCR e MCR são estabelecidos juntamente com a conexão, bem como os parâmetros MBS (*Maximum Burst Size*) e MFS (*Maximum Frame Size*), que estão associados à garantia da MCR [11]. Vale ressaltar que esta garantia implica na transmissão de quadros compatíveis [3].

Para serem considerados quadros compatíveis, as células devem atender às três condições listadas a seguir.

- As células devem ser consideradas compatíveis após a execução do algoritmo GCRA (*Generic Cell Rate Algorithm*).
- A prioridade de descarte indicada pelo bit CLP do cabeçalho da primeira célula de um quadro, deve ser a mesma para todas as células que o constituem.
- A quantidade de células que constituem um quadro não pode exceder o limite estabelecido pelo parâmetro MFS.

O algoritmo GCRA [3] é utilizado para definir a compatibilidade das células no que diz respeito ao contrato de tráfego assumido no estabelecimento da conexão.

Vale ressaltar que, a MCR somente será garantida aos quadros compatíveis constituídos por células que apresentem baixa prioridade de descarte ($CLP = 0$), ou seja, aquelas cujo conteúdo é imprescindível para a integridade das informações transmitidas.

3.3.2.1. Mecanismos para Implementação da Categoria GFR

Alguns mecanismos podem ser utilizados pela rede para a garantia da MCR nas conexões GFR. Destacam-se, entre eles, os mecanismos de rotulação (*tagging*), gerenciamento de *buffers* e escalonamento (*scheduling*) [3].

- Rotulação

O mecanismo de rotulação pode ser usado para a redução da prioridade de quadros não adequados a uma determinada garantia de QoS, antes da entrada destes quadros na rede. Desta forma, é possível isolar-se os tráfegos adequado e não adequado em cada conexão, permitindo que o tráfego adequado seja tratado preferencialmente, como por exemplo no caso do limite

de ocupação de um *buffer* ser ultrapassado. Neste caso, apenas os quadros adequados não serão descartados.

- Gerenciamento de *Buffers*

O gerenciamento de *buffers* é realizado pelos *switches* ATM visando controlar o número de células que são admitidos em seus *buffers*. Em ambientes de compartilhamento de *buffers*, onde múltiplas conexões compartilham um espaço comum, o gerenciamento por conexão pode controlar o nível de ocupação dos *buffers* de conexões individuais. O gerenciamento por conexão utiliza um mecanismo chamado *Per-VC-Accounting* para manter o monitoramento do nível de ocupação de cada conexão. Os mecanismos FBA (*Fair Buffer Allocation*) e *Selective Drop* são exemplos de gerenciamento de *buffers*. Vale ressaltar que, o mecanismo *Per-VC-Accounting* introduz *overhead* na transmissão, mas sem ele é difícil o controle da ocupação dos *buffers* de conexões individuais.

- Escalonamento

Enquanto os mecanismos de rotulação e de gerenciamento de *buffers* controlam a entrada de células nos *switches* ATM, o mecanismo de escalonamento utiliza de estratégias de enfileiramento para determinar como as células serão escalonadas no próximo salto. Em filas que utilizam a estratégia FIFO, as referidas células são escalonadas na mesma ordem em que entram nos *buffers*. Como consequência, filas FIFO não podem isolar células de diferentes conexões que entram nestas filas. Por outro lado, a adoção de uma fila para cada conexão permite o isolamento das células de cada uma delas. Neste caso, o mecanismo de escalonamento pode selecionar entre as filas, qual deve ser escalonada em um determinado instante de tempo. Entretanto, como no gerenciamento de *buffers*, no mecanismo de escalonamento há introdução de *overhead*.

3.3.2.2. Mecanismo EPD

O mecanismo EPD (*Early Packet Discard*) é utilizado em associação com os mecanismos de gerenciamento de *buffers*, realizando o descarte completo das células de um quadro. Especificamente, um limite R menor que o tamanho do *buffer* dos *switches* ATM é estabelecido. Quando o comprimento de uma fila excede este limite, todas as células de qualquer novo quadro são descartadas. Para quadros que tenham sido parcialmente recebidos antes que a fila ultrapasse o limite R, é ainda permitido sua completa recepção, desde que exista espaço no *buffer* [47].

Uma outra estratégia de implementação do EPD utiliza dois limites para a ocupação dos *buffers* em associação com o mecanismo de rotulação [48]. A figura 3.6 ilustra esta estratégia.

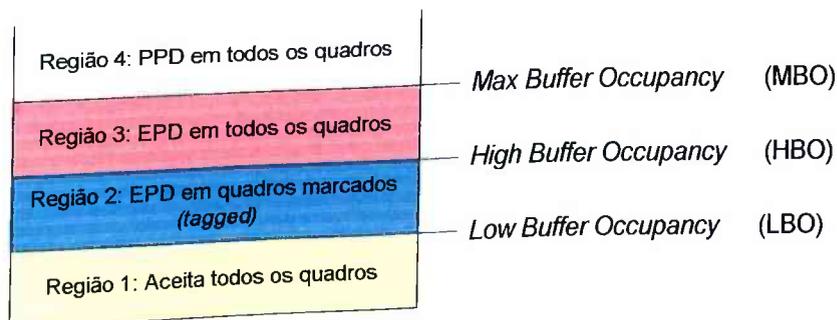


Figura 3.6. Estratégia de Implementação do Mecanismo EPD.

Quando a primeira célula de um quadro possui um rótulo e o nível de ocupação do *buffer* excede o limite LBO, mas está abaixo do limite HBO, todas as células do quadro são descartadas. Caso o nível de ocupação esteja abaixo do limite LBO, todas as células dos quadros são aceitas no *buffer*, independente de possuírem ou não um rótulo. Em último caso, o EPD é realizado em todos os quadros na região 3, uma vez que o limite HBO foi excedido. Nas regiões 1, 2 e 3 é garantido o descarte de células no nível de quadros, ou seja, nestas

regiões no caso de ocorrerem descartes de células, são descartadas todas as células de um quadro. Por fim, se o nível de ocupação do *buffer* exceder o limite máximo de ocupação (MBO), as células são descartadas devido a ausência de espaço disponível no *buffer*. Neste caso, é possível o descarte de parte das células de um quadro.

3.3.2.3. Implementação do Mecanismo *Selective Drop* Utilizando *Per-VC-Accounting*

A utilização do mecanismo *Per-VC-Accounting* permite uma justa distribuição da banda passante disponível no enlace. Caso um VC utilize excessivamente a banda passante disponível ou a capacidade de *buffer*, este VC pode ser penalizado com a restrição dos recursos a ele disponibilizados [49, 47].

No mecanismo *Selective Drop* é mantido um monitoramento das atividades em cada VC. Este monitoramento é realizado através da contagem do número de células presentes em cada VC de um determinado *buffer*. Uma alocação justa (*Fair Allocation*) da capacidade de *buffer* disponível é calculada através da equação 3.18.

$$Fair_Allocation = \frac{X}{N_a} \quad (3.18)$$

Na equação 3.18, X denota o nível de ocupação do *buffer* e N_a o número de VCs ativos. Vale ressaltar que, um VC é considerado ativo se possui no mínimo uma célula no *buffer*.

A razão do número de células de cada VC em um *buffer* dividida pela *fair allocation* fornece a medida de quanto um VC está sobrecarregando o *buffer*. A equação 3.19 é utilizada no cálculo da razão de carga de um determinado VCi, onde Y_i é o número de células deste VC presentes no *buffer*.

$$\text{Razão de Carga}(VC_i) = \frac{Y_i * N_a}{X} \quad (3.19)$$

Caso a razão de carga de um VC seja maior que o Fator Linear de Escala (Z), então novas células deste VC são descartadas, ou seja, é dada a preferência a VCs cuja razão de carga não exceda o referido fator [47, 38].

A figura 3.7 ilustra o mecanismo *selective drop*. Para um *buffer* de tamanho K (células), o mecanismo *selective drop* atribui um limite mínimo R (células). Caso o nível de ocupação do *buffer*, que corresponde ao limite X , seja menor ou igual ao limite R , não ocorre o descarte de células. Já se o nível de ocupação é maior que R , então as células do primeiro novo quadro do VC_i serão descartadas, caso sua razão de carga seja maior que Z .

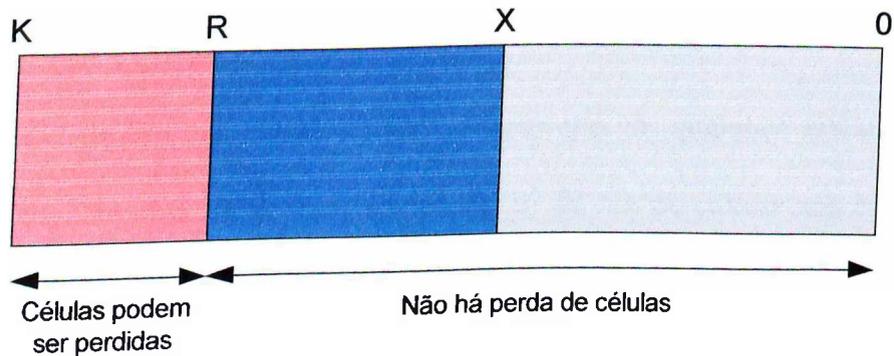


Figura 3.7. Mecanismo *Selective Drop*.

3.3.2.4. Mecanismo FBA

O mecanismo FBA (*Fair Buffer Allocation*) utiliza uma forma flexível (*smooth*) do Fator Linear de Escala para a comparação com a razão de carga de um determinado VC. Para tanto, o FBA faz uso do nível atual de carga no *switch* ATM, determinando desta forma o quanto este *switch* está congestionado. Para um tamanho K de *buffer*, se o nível de ocupação X é menor ou igual ao limite R , então não ocorrem descartes de células. Quando o nível de ocupação é maior que R , todas as células de um novo quadro do VC_i serão descartadas se:

$$(X > R) e \{Y_i * N_a / X > Z[(K - R)/(X - R)]\} \quad (3.20)$$

Percebe-se que nem sempre, quando o nível de ocupação X excede o limite R , as células dos novos quadros serão descartadas. A razão de carga verificada na equação 3.20 determina se o VCI está utilizando um montante de espaço do *buffer* além do permitido a ele para uma determinada *fair allocation*. Neste caso, X/N_a é usada como medida da *fair allocation* de cada VC e $Z * [(K-R)/(X-R)]$ é o limite para descarte do *buffer*. Caso o nível de ocupação atual do *buffer* Y_i seja maior que este limite dinâmico vezes a *fair allocation*, as células dos novos quadros do VCI serão descartadas [46].

Vale ressaltar que, valores de R próximos ao tamanho máximo do *buffer* garantem maior eficiência à transmissão, através da maior utilização do *buffer* [47].

3.3.2.5. Técnica Per-VC-WRR

Dois casos devem ser considerados no emprego de qualquer estratégia visando a implementação da categoria GFR, se o comprimento da fila de células nos *buffers* excede o limite LBO ou se está abaixo deste limite. No primeiro caso, estando o comprimento da fila de células entre os limites LBO e HBO, a taxa de admissão de células no *buffer* de cada VC é limitada pela MCR de cada um. Células de quadros que chegam a uma taxa superior a MCR são rotuladas (*tagged*) e conseqüentemente descartadas nesta região do *buffer*. Logo, o comprimento da fila de células de cada VC, bem como a taxa de admissão de células, são obtidos em uma função da MCR de cada um destes VCs [48].

Para o caso em que o comprimento da fila de células está abaixo do limite LBO, a taxa de admissão de células nos *buffers* é igual à taxa do fluxo que entra nestes *buffers*, ou seja, todos as células de quadros, marcados ou não são aceitas. Entretanto, neste caso não é possível se garantir que a taxa de admissão de células em cada VC seja estabelecida em função de suas MCRs.

A estratégia conhecida como *Round Robin* (RR), permite que a taxa de admissão de células seja a mesma para cada VC, independentemente do valor de suas MCRs [11].

A implementação da categoria GFR através da técnica Per-VC-WRR (*Weighted Round Robin*) é uma combinação do mecanismo de gerenciamento de *buffers* FBA e do mecanismo de escalonamento WRR, que utiliza a estratégia RR. Nesta técnica, estabelecida uma fila para cada VC, o mecanismo WRR as escalona em função do nível de ocupação dos *buffers* dos *switches* ATM, cabendo ao mecanismo FBA reduzir tal nível sempre que o comprimento da fila de células de um determinado VC ultrapasse o limite para o descarte de células. A figura 3.8 ilustra a técnica Per-VC-WRR.

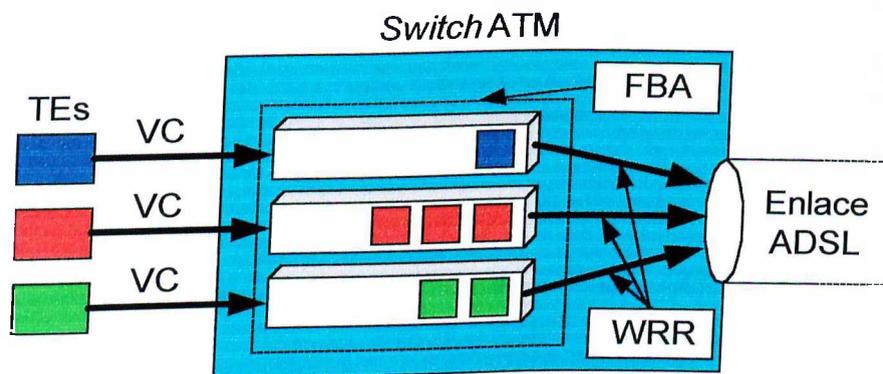


Figura 3.8. Técnica Per-VC-WRR.

3.4. PROPOSTA DE MINIMIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DE BANDA PASSANTE DISPONÍVEL PARA APLICAÇÕES TCP/IP SOBRE UMA REDE DE ACESSO BASEADA EM ATM SOBRE ADSL

Como consequência da variação de banda passante disponível no enlace ADSL poderão ocorrer perdas de informações, devido ao descarte de células nos *buffers* dos *switches* ATM associados aos ATUs. Este descarte é resultado de um elevado nível de ocupação dos referidos *buffers* acima do espaço disponível para o armazenamento de células. Neste

contexto, o controle de tráfego ATM será empregado com o propósito de minimizar estas perdas, através da compensação dos efeitos da variação de banda.

Inicialmente, propõe-se a utilização do controle realizado pela categoria ABR, o qual está ilustrado na figura 3.9.

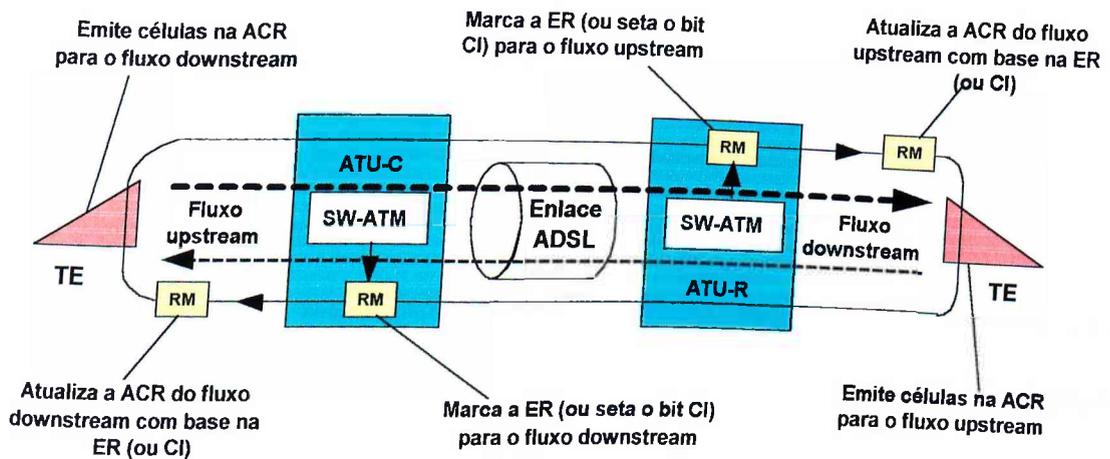


Figura 3.9. Controle ABR no Enlace ADSL.

Quando a banda passante ADSL sofre uma variação, por exemplo, uma redução no fluxo *upstream*, o *switch* ATM associado ao ATU-C marca no campo ER das células RM, o valor da taxa correspondente a atual disponibilidade de banda passante no enlace. Alternativamente, esta marcação pode ser realizada através do bit CI das células RM, que passa a ter o seu valor igual a 1, caso o comprimento da fila de células no *buffer* do *switch* ATM exceda um limite pré determinado. Desta forma, é possível ajustar a ACR de cada TE fonte que esteja enviando dados, de acordo com as variações de banda passante do enlace ADSL, ou seja, este ajuste faz com que a taxa de emissão de células procure acompanhar as variações de banda passante, mantendo um adequado nível de ocupação dos *buffers* (abaixo do limite pré-determinado para o descarte de células), evitando o descarte de células e

consequentemente permitindo que se alcance níveis de perdas adequados à obtenção de uma determinada QoS.

Para que o controle ABR acima descrito seja estabelecido, é necessário que os TEs associados à fonte e ao destino das informações, sejam capazes de cumprir com as exigências deste controle, como por exemplo, a transmissão de células RM e a atualização da ACR. Como nem sempre isto é possível, uma proposta alternativa ao controle ABR na minimização dos efeitos da variação de banda passante no enlace ADSL é a utilização da categoria de serviço GFR. Esta categoria, como mencionado anteriormente, é capaz de garantir aos VCs uma taxa mínima de transmissão no nível de quadros, permitindo ainda a utilização da banda passante adicional que é disponibilizada dinamicamente no enlace. A categoria GFR será inicialmente implementada através da técnica Per-VC-WRR que é uma combinação dos mecanismos de gerenciamento de *buffers* (FBA) e de escalonamento (WRR).

Neste trabalho propõe-se uma outra possibilidade de implementação da categoria GFR, através da utilização de um mecanismo de controle ABR baseado na marcação da ER (algoritmo ERICA+). Tal proposta emprega a técnica VS/VD, estabelecendo um *loop* de controle ABR entre os *switches* ATM associados aos ATUs, como mostra a figura 3.10.

É possível observar através da figura 3.10 que não existe qualquer tipo de controle da taxa de emissão de células dos TEs, o que pode ocasionar o descarte de células nos VS *buffers* quando a ACR for reduzida pelo controle ABR em função das variações de banda passante no enlace ADSL. Visando reduzir ao máximo o nível de descarte de células, implementou-se nos VS *buffers* o mecanismo EPD, que promove o descarte de células. Logo, com a adoção desta implementação é possível o controle do tráfego que é injetado no enlace ADSL, evitando que os *buffers* dos *switches* ATM sejam sobrecarregados, o que garante aos usuários o alcance de uma determinada QoS na transmissão de informações.

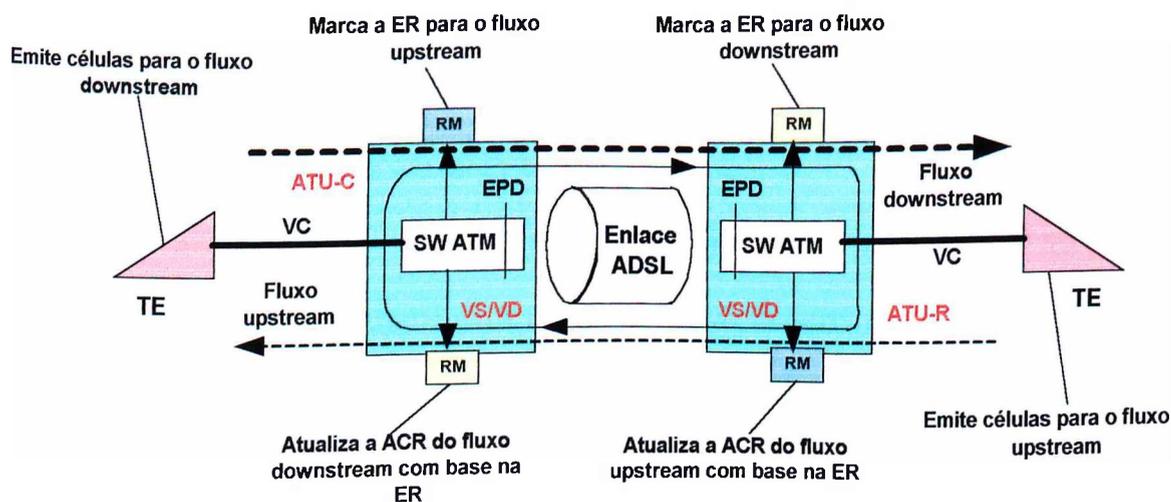


Figura 3.10. Implementação GFR empregando um mecanismo de Controle ABR.

Portanto, visando-se solucionar o problema da variação de banda passante no enlace ADSL, optou-se pela implementação do controle de tráfego ATM realizado pela categoria de serviço ABR, através dos algoritmos ERICA+ e EPRCA, e pela categoria GFR, através da técnica Per-VC-WRR e da implementação desta categoria utilizando um mecanismo de controle ABR. Vale ressaltar que, no capítulo 4 serão apresentados os resultados de simulações das implementações anteriormente mencionadas, bem como uma comparação da eficiência de tais implementações em função dos referidos resultados.

3.5. CONCLUSÕES

Considerando-se a necessidade atual de garantir às transmissões um determinado nível de QoS às aplicações em banda larga, a utilização de um protocolo de transporte como o TCP, que realiza um controle de fluxo associado a um controle de congestionamento, contribui de forma decisiva para que se possa alcançar um alto desempenho nas transmissões de informações. A adoção de algoritmos como o *Slow Start* que permite a rápida redução do tráfego na rede, associada aos algoritmos *Congestion Avoidance*, *Fast Retransmit* e *Fast*

Recovery que garantem um adequado nível de vazão às conexões TCP, mesmo em situações de congestionamento, confere ao serviço de transporte realizado pelo TCP, a eficiência necessária para a sua utilização em larga-escala.

No que diz respeito ao controle de tráfego realizado pelas categorias de serviço ABR e GFR percebe-se que o seu emprego é de fundamental importância para a garantia de um determinado nível de QoS, uma vez que os mecanismos utilizados por estas categorias combatem fatores como, o descarte de células, que provoca a degradação da QoS.

O controle de fluxo realizado pela categoria ABR possibilita a efetiva utilização dos recursos da rede (banda passante disponível e espaço dos *buffers*), através do emprego de algoritmos como o EPRCA e o ERICA+. Como resultado do emprego destes algoritmos, a categoria ABR é capaz de garantir o alcance de uma adequada taxa de transmissão independentemente das variações no tráfego da rede.

A categoria GFR implementada através de mecanismos que fazem o gerenciamento do montante de espaço utilizado por cada VC nos *buffers*, garante uma taxa mínima de transmissão aos referidos VCs no nível de quadros. Este gerenciamento proporciona ainda uma justa distribuição dos recursos da rede entre os VCs.

Portanto, a utilização do controle de tráfego ATM realizado pelas categorias de serviço ABR e GFR possibilita a garantia de um determinado nível de QoS, o qual está associado à integridade na entrega das informações.

CAPÍTULO 4

ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO DAS CATEGORIAS DE SERVIÇO ABR E GFR NA MINIMIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DE BANDA PASSANTE NO ENLACE ADSL

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será realizado um estudo comparativo de desempenho das categorias de serviço ABR e GFR na minimização da variação de banda passante disponível para aplicações TCP/IP sobre uma rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL.

Com este objetivo, inicialmente foi elaborado um modelo de simulação para o sistema real que permitiu a obtenção das medidas de desempenho necessárias a elaboração do referido estudo. Neste modelo foram incorporadas as aplicações TCP/IP, as variações de banda passante disponível no enlace ADSL e também o controle de tráfego realizado pelo ATM. Na seqüência foram determinados os parâmetros de entrada e saída de acordo com o programa simulador utilizado.

Visando avaliar o desempenho sob várias condições de tráfego, para a solução do modelo adotou-se uma estratégia de execução baseada em condições de simulação, os quais representam os fluxos de dados *upstream* e *downstream*.

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos por meio das simulações, comparando-os em função da implementação do controle de tráfego ATM. Especificamente,

serão comparadas as técnicas ABR-ER (algoritmos ERICA+ e EPRCA), ABR-*Binary* (EFCI), GFR (Per-VC-WRR), a implementação da categoria de serviço GFR empregando-se um mecanismo de controle de fluxo realizado pela categoria ABR, bem como quando não se utiliza qualquer tipo de controle.

Encerrando o capítulo serão apresentadas as conclusões a respeito do controle de tráfego ATM para as variações de banda passante no enlace ADSL, apresentando a técnica que melhor compensou estas variações.

4.2. MODELAGEM DO SISTEMA

O modelo de simulação foi implementado utilizando-se o programa-simulador NIST ATM [17]. Para tanto, considerou-se o cenário de rede apresentado na figura 4.1. Neste modelo incorpora-se as aplicações TCP/IP, as variações de banda do enlace ADSL, bem como o controle de tráfego realizado pelo ATM, ou seja, ele atribuirá aos seus componentes os efeitos causados pela transmissão através da referida rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL. Especificamente, considera-se que diversas conexões TCP são multiplexadas em um enlace ADSL através de conexões ATM. Logo, uma conexão TCP é estabelecida sobre uma conexão ATM (um VC). A distância entre os TEs geradores do fluxo de dados *downstream* (provedores de serviços) e o ATU-C foi estabelecida em 10 km, enquanto a distância entre o ATU-R e os TEs geradores do fluxo de dados *upstream* (terminais situados nas instalações do usuário) foi estabelecida em 10 m. Já a distância entre o ATU-C e o ATU-R, que compreende o enlace ADSL, foi estabelecida em 1 km.

Os componentes que constituem o modelo e suas principais características são apresentados a seguir.

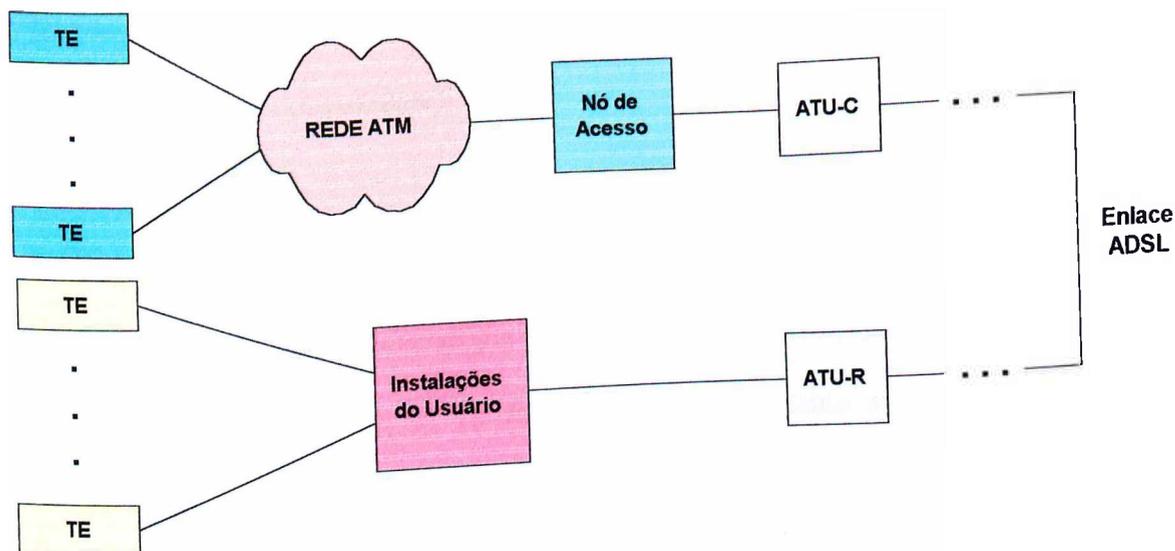


Figura 4.1. Cenário de Rede.

- TE

Este componente simula um terminal de banda larga do usuário ou um provedor de serviços, através da simulação do comportamento de uma fonte de tráfego TCP/IP, realizada por meio de um gerador de tráfego.

- Rede ATM

Neste bloco são realizadas as funções de comutação ou roteamento de diversos enlaces de canais virtuais (VCLs – *Virtual Channel Links*), que formam uma VCC (*Virtual channel Connection*), de enfileiramento e armazenamento temporário das células ATM, bem como o controle de tráfego ATM (ABR e GFR).

- Enlace ADSL

Este componente simula o enlace ADSL implementado sobre um meio físico de transmissão, que neste caso são pares trançados. Neste enlace, que possui 1 km de extensão,

estão presentes as unidades de transmissão ADSL, responsáveis pela transmissão dos fluxos de dados *upstream* e *downstream*.

4.3. SOLUÇÃO DO MODELO

De acordo com a estratégia de execução adotada para a solução do modelo, inicialmente foram simuladas as variações de banda passante no enlace ADSL, através da distribuição uniforme da taxa de transmissão disponível no enlace ADSL, a cada intervalo de tempo de $T_{upstream}$ e $T_{downstream}$ segundos. A fim de simular variações a curto e longo prazo, o referido intervalo de tempo variou de 0,01 a 10 segundos. Para o fluxo de dados *upstream*, a taxa de transmissão foi uniformemente variada entre 128 kbps e 1,1 Mbps e, para o fluxo de dados *downstream* entre 1,5 Mbps e 8 Mbps [10].

Em seguida, visando avaliar o desempenho sob várias condições de tráfego, foram consideradas as seguintes condições de simulação:

- Condição 1 (Fluxo *Upstream*): as conexões TCP estabelecidas enviam dados apenas na direção *upstream*.
- Condição 2 (Fluxo *Downstream*): as conexões TCP estabelecidas enviam dados apenas na direção *downstream*.

Estas condições foram simuladas com o objetivo de avaliar como as variações de banda passante disponível no enlace ADSL, nas direções *upstream* e *downstream*, afetam a vazão alcançada pelo TCP e, como o controle de tráfego ATM realizado pelas categorias ABR e GFR busca minimizar os efeitos provenientes destas variações.

Os parâmetros utilizados nas simulações foram os seguintes:

- Comprimento do *Buffer* dos *Switches* ATM = 512, 1.024 e 1.536 células
- Parâmetros do controle de congestionamento TCP
 - Algoritmo para controle de congestionamentos = TCP Reno
 - MSS (*Maximum Segment Size*) = 9.140 bytes
 - *Maximum Window Size* = 64 kbytes
- Parâmetros do controle de tráfego ABR-ER
 - $PCR_{upstream} = 1,1$ Mbps
 - $PCR_{downstream} = 8$ Mbps
 - $MCR_{upstream} = 128$ kbps
 - $MCR_{downstream} = 1,5$ Mbps
 - $Nrm = 32$

1) Algoritmo ERICA+

Fluxo Upstream

- $T0 = 82,8$ ms
- $a = 1,5$
- $b = 1,5$
- $QDLF$ (*Queue Drain Limit Factor*) = 0

Fluxo Downstream

- $T0 = 10,6$ ms
- $a = 1,15$
- $b = 1,05$
- $QDLF$ (*Queue Drain Limit Factor*) = 0,8

2) Algoritmo EPRCA

- ERF (*Explicit Reduction Factor*) = 0,9375

- VCS (*VC Separator*) = 0,875
 - AV (*Average Factor*) = 0,0625
 - DQT = 2.000 células
 - MRF (*Major Reduction Factor*) = 0,95
 - DPF (*Down Pressure Factor*) = 0,875
 - Limite para detecção de congestionamentos (HT - *High Threshold*) = 819 células
- Parâmetros do controle de tráfego ABR-*Binary* (EFCD)
 - Nrm = 32
 - Limite para detecção de congestionamentos (ABR-*Binary* original) = 256 células
 - Limite para detecção de congestionamentos (Low-T) = 40 células

Fluxo Upstream

- $PCR_{upstream} = 1,1 \text{ Mbps}$
- $MCR_{upstream} = 128 \text{ kbps}$
- RIF = 1/16
- RDF = 1/4

Fluxo Downstream

- $PCR_{downstream} = 8 \text{ Mbps}$
- $MCR_{downstream} = 1,5 \text{ Mbps}$
- RIF = 1/512
- RDF = 1/256

- Parâmetros do controle de tráfego GFR
 - $PCR_{upstream} = 1,1 \text{ Mbps}$
 - $PCR_{downstream} = 8 \text{ Mbps}$

- $MCR_{upstream} = 128$ kbps
- $MCR_{downstream} = 1,5$ Mbps

Per-VC-WRR

- Mecanismo de gerenciamento de *buffer*: FBA (*Fair Buffer Allocation*)
- R (*Minimum Drop Threshold*) = 921 células
- Z (*Linear Scale Factor*) = 0,8

GFR utilizando mecanismo de controle ABR

- Mecanismo de descarte = EPD (*Early Packet Discard*)
- Limite para descarte = 670 células

Vale ressaltar que, foram também realizadas simulações nas direções *upstream* e *downstream* variando-se o número de conexões estabelecidas (VCs ativos).

4.4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES

Com o objetivo de analisar o resultado da atuação das técnicas de controle de tráfego ATM considerando-se a banda passante variante do enlace ADSL, para os fluxos de dados *upstream* e *downstream*, foram executadas diversas simulações baseadas nas condições de simulação apresentadas na seção 4.3, com a duração média de 40 segundos para cada simulação.

Os resultados de tais simulações foram avaliados em função de medidas de desempenho como a vazão do TCP, a taxa média de utilização do enlace ADSL, a ACR, o comprimento máximo das filas de células nos *buffers* dos *switches* ATM, a variação da janela

de congestionamento (CWND) e a justiça (*fairness*) na distribuição de recursos (banda passante disponível no enlace e espaço de armazenagem nos *buffers*) entre os VCs.

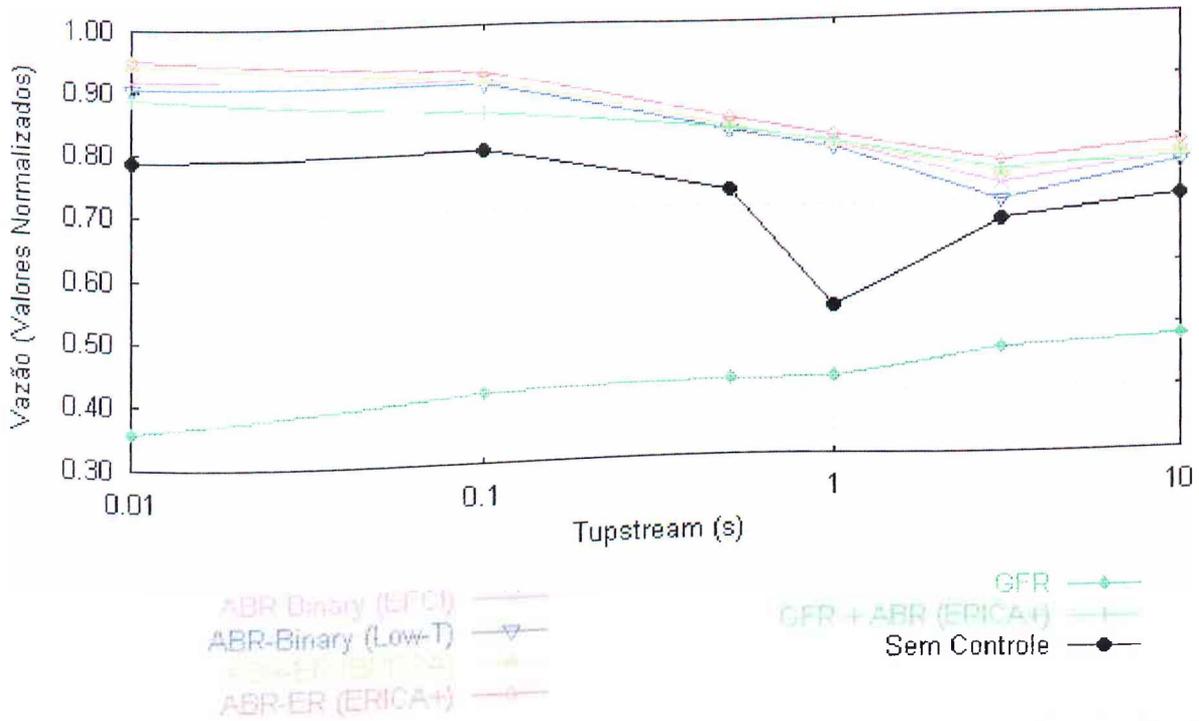
4.4.1. Desempenho Obtido para o Fluxo *Upstream* (Condição 1)

Inicialmente foi medida a vazão do TCP em função da frequência das variações na banda passante disponível no enlace ADSL, respeitando-se o intervalo de 0,01 a 10 segundos para as referidas variações, como mostra a figura 4.2. Os valores para a vazão foram normalizados pelo valor ideal, como forma de medir-se a eficiência das diversas técnicas de controle empregadas. O valor ideal para vazão pode ser calculado através da equação 4.1.

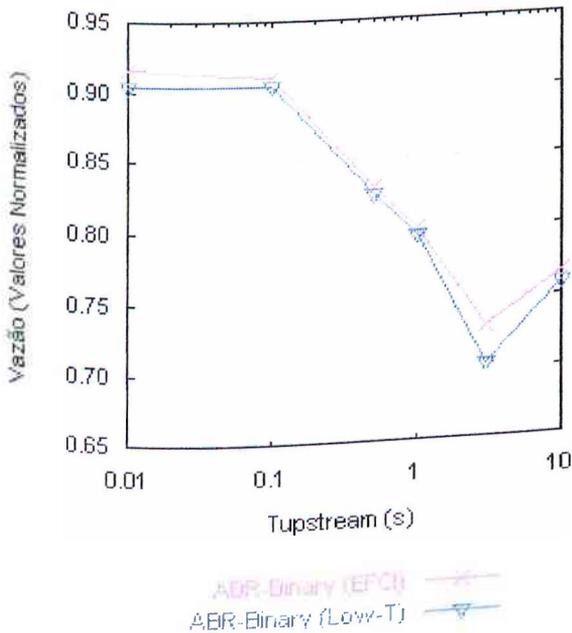
$$VazãoIdeal = [Banda_passante_média \text{ (banda passante medida durante os 40 s de simulação)} * 48 / 53 \text{ (Carga útil ATM)} * 9.140 \text{ (MSS)}] / [20 + 20 + 8 + 28 \text{ (cabeçalho_TCP + cabeçalho_IP + AAL5_trailer + padding)} * 31 / 32 \text{ (overhead ABR)}] \quad (4.1)$$

Observando-se a figura 4.2, nota-se que a utilização do controle de tráfego ABR, através das técnicas ABR-ER (algoritmos ERICA+ e EPRCA), ABR-*Binary* e através de sua associação com a categoria GFR, permitiu o alcance de um melhor desempenho em termos da vazão do TCP, se comparado ao desempenho obtido pela categoria GFR e quando não se utiliza qualquer tipo de controle (sem controle).

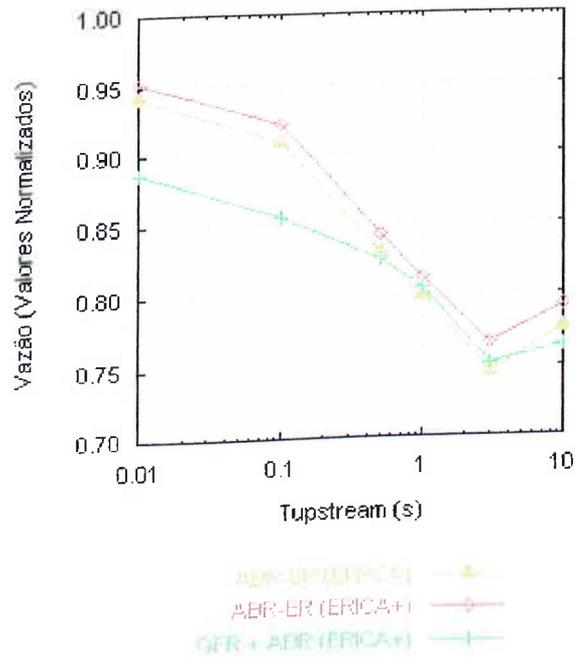
Com relação aos serviços da categoria GFR implementados utilizando-se a técnica Per-VC-WRR, é possível observar através da figura 4.2, que foi obtido um melhor desempenho em termos da vazão do TCP para as variações de longo prazo (1, 3 e 10 s), devido ao menor índice de descarte de células nos *buffers* para estas variações. Porém, tal desempenho foi inferior ao alcançado utilizando-se a categoria ABR, devido à utilização ineficiente da banda passante, agravada pela emissão de células dos TEs a uma taxa que não



(a) Vazão do TCP para o Fluxo *Upstream* utilizando-se as Técnicas ABR_Binary (original e Low-T), ABR-ER (ERICA+ e EPRCA), GFR, GFR + ABR e Sem Controle



(b) Vazão do TCP para o Fluxo *Upstream* utilizando-se as Técnicas ABR_Binary (original e Low-T)



(c) Vazão do TCP para o Fluxo *Upstream* utilizando-se as Técnicas ABR-ER (ERICA+ e EPRCA) e GFR + ABR

Figura 4.2. Vazão do TCP para o Fluxo *Upstream*.

acompanha adequadamente as variações de banda passante no enlace ADSL. Já a implementação da categoria GFR utilizando-se um mecanismo de controle ABR, apresentou um melhor desempenho para as variações de curto prazo (0,01 e 0,1 segundos) em virtude do controle de tráfego realizado pelo mecanismo ABR, o qual resulta na utilização mais eficiente da banda passante.

Uma análise mais detalhada da figura 4.2 comprova que independentemente do controle de tráfego ABR empregado, sua atuação foi mais efetiva com relação às variações de curto prazo da banda passante. De modo geral, uma redução na banda passante do enlace corresponderá a uma redução no valor da ACR a ser utilizada pelos TEs fontes para estabelecerem suas taxas de emissão de células. Consequentemente, a frequência de transmissão das células RM também será reduzida. Neste caso, quando ocorrer um aumento na banda passante disponível no enlace ADSL, o sistema não será capaz de responder imediatamente a este aumento, uma vez que, a atualização da ACR está associada ao recebimento das células RM. Logo, ocorrerá um atraso na detecção das variações de curto prazo, o que acarretará em variações distintas da ACR, dependendo da técnica de controle empregada. As figuras 4.2-b e 4.2-c apresentam, respectivamente, as diferentes implementações da técnica *ABR-Binary* e da técnica *ABR-ER*, bem como esta última associada à categoria GFR. O comportamento da ACR para o intervalo de variações da banda *Tupstream* igual a 0,1 s está apresentado na figura 4.3. Apenas para a técnica *ABR-ER* que utiliza o algoritmo ERICA+ é também apresentado o comportamento da ACR para *Tupstream* igual a 1 s.

Utilizando-se a técnica *ABR-Binary*, as variações na banda passante somente serão detectadas após o comprimento das filas de células nos *buffers* dos *switches* ATM associados ao ATU-R excederem o limite preestabelecido para detecção de congestionamentos [10]. Neste caso, a frequência de alterações da ACR não será capaz de acompanhar as variações na

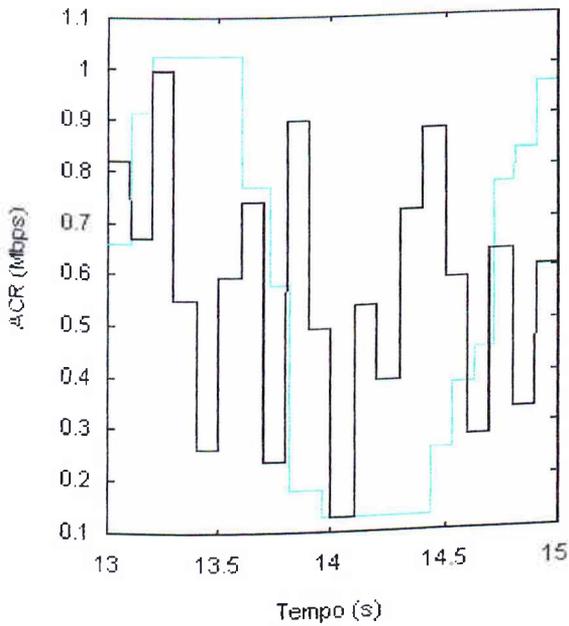


Figura 4.3 (a) Variação da ACR para o Fluxo *Upstream* utilizando-se a Técnica ABR-Binary e $T_{Upstream} = 0,1$ s

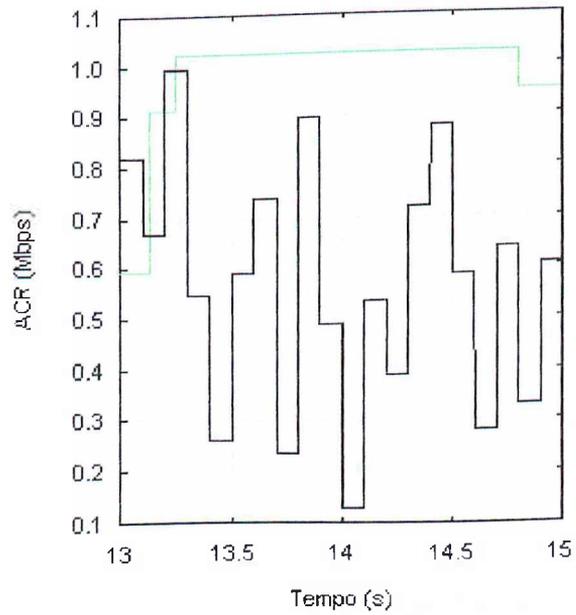


Figura 4.3 (b) Variação da ACR para o Fluxo *Upstream* utilizando-se a Técnica ABR-ER (EPRCA) e $T_{Upstream} = 0,1$ s

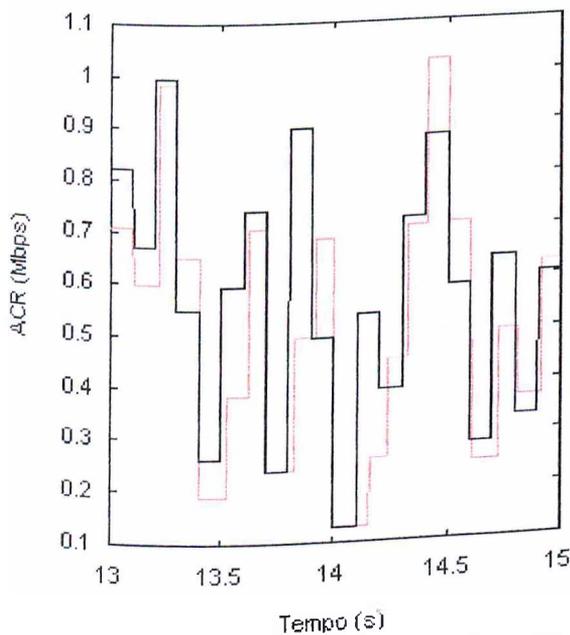


Figura 4.3 (c) Variação da ACR para o Fluxo *Upstream* utilizando-se a Técnica ABR-ER (ERICA+) e $T_{Upstream} = 0,1$ s

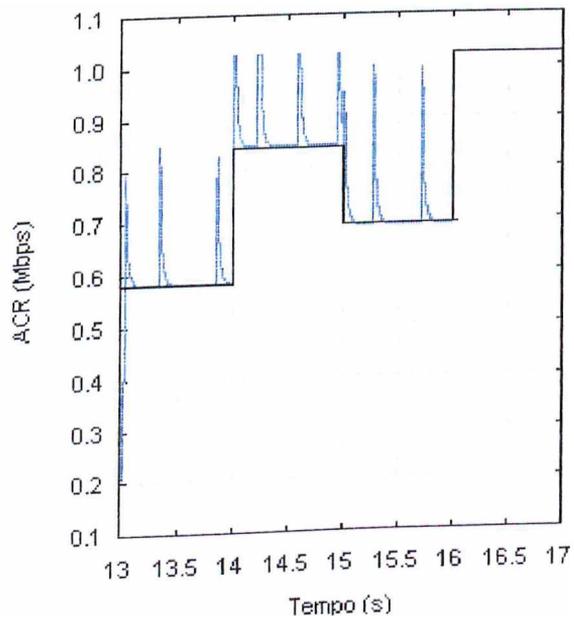


Figura 4.3 (d) Variação da ACR para o Fluxo *Upstream* utilizando-se a Técnica ABR-ER (ERICA+) e $T_{Upstream} = 1$ s

— ABR-ER (EPRCA)
— ABR-Binary (EFCI)
— Banda Passante ADSL
— ABR-ER (ERICA+) (for T_{Upstream} = 0,1 s)
— ABR-ER (ERICA+) (for T_{Upstream} = 1 s)

Figura 4.3. Variações da ACR para o Fluxo *Upstream*.

banda passante, como mostrado na figura 4.3-a.

Para a técnica ABR-ER que utiliza o algoritmo EPRCA, a detecção das variações de curto prazo na banda passante também estará relacionada com a superação do limite preestabelecido para a detecção de congestionamentos, devido à utilização da MACR na atualização da ACR. Especificamente, a MACR será constantemente incrementada, independente da variação da banda, até que o referido limite seja ultrapassado. Como conseqüência, a ACR não será capaz de acompanhar as variações da banda, apresentando uma determinada estabilidade. O comportamento da ACR para esta técnica de controle está apresentado na figura 4.3-b.

No que diz respeito à técnica ABR-ER que utiliza o algoritmo ERICA+, o menor atraso na detecção das variações de curto prazo da banda passante, resulta na proximidade entre tais variações e as variações da ACR, como mostra a figura 4.3-c. Esta proximidade é resultado do gerenciamento dos *buffers* dos *switches* ATM realizado pelo algoritmo ERICA+, o qual utiliza o nível de ocupação destes *buffers* para a determinação do atraso de enfileiramento ideal das células (T_0 - *Target Queuing Delay*). O emprego deste gerenciamento de *buffers* contribui ainda para que o nível de ocupação dos *buffers* dos *switches* permaneça em um patamar que evite o descarte de células, conseqüentemente contribuindo para a alta vazão alcançada pelo TCP com o uso desta técnica.

Ainda com relação à técnica que utiliza o algoritmo ERICA+, conforme mostra a figura 4.3-d, o comportamento da ACR apresenta variações dentro do intervalo $T_{upstream} = 1$ s, as quais são responsáveis pelo desempenho inferior apresentado por esta técnica no que diz respeito às variações de longo prazo.

A figura 4.4 mostra o nível de ocupação dos *buffers* para o intervalo de simulação entre 15 e 40 s. Percebe-se que na técnica ABR-ER, o algoritmo ERICA+ apresentou um melhor desempenho que o algoritmo EPRCA (figura 4.4-a), devido principalmente a este

último algoritmo não realizar qualquer tipo de gerenciamento no nível de ocupação dos *buffers*. Claramente, com a utilização do EPRCA, até que a ACR comece a ser reduzida, em razão da detecção das variações na banda passante do enlace, o comprimento das filas de células é incrementado, ocasionando desta forma o aumento do atraso de enfileiramento e, por consequência, do nível de ocupação dos *buffers*. No que diz respeito à implementação dos serviços GFR utilizando-se um mecanismo de controle ABR, percebe-se que a utilização do algoritmo ERICA+ garantiu um adequado nível de ocupação dos *buffers* (abaixo do limite preestabelecido para o descarte de células).

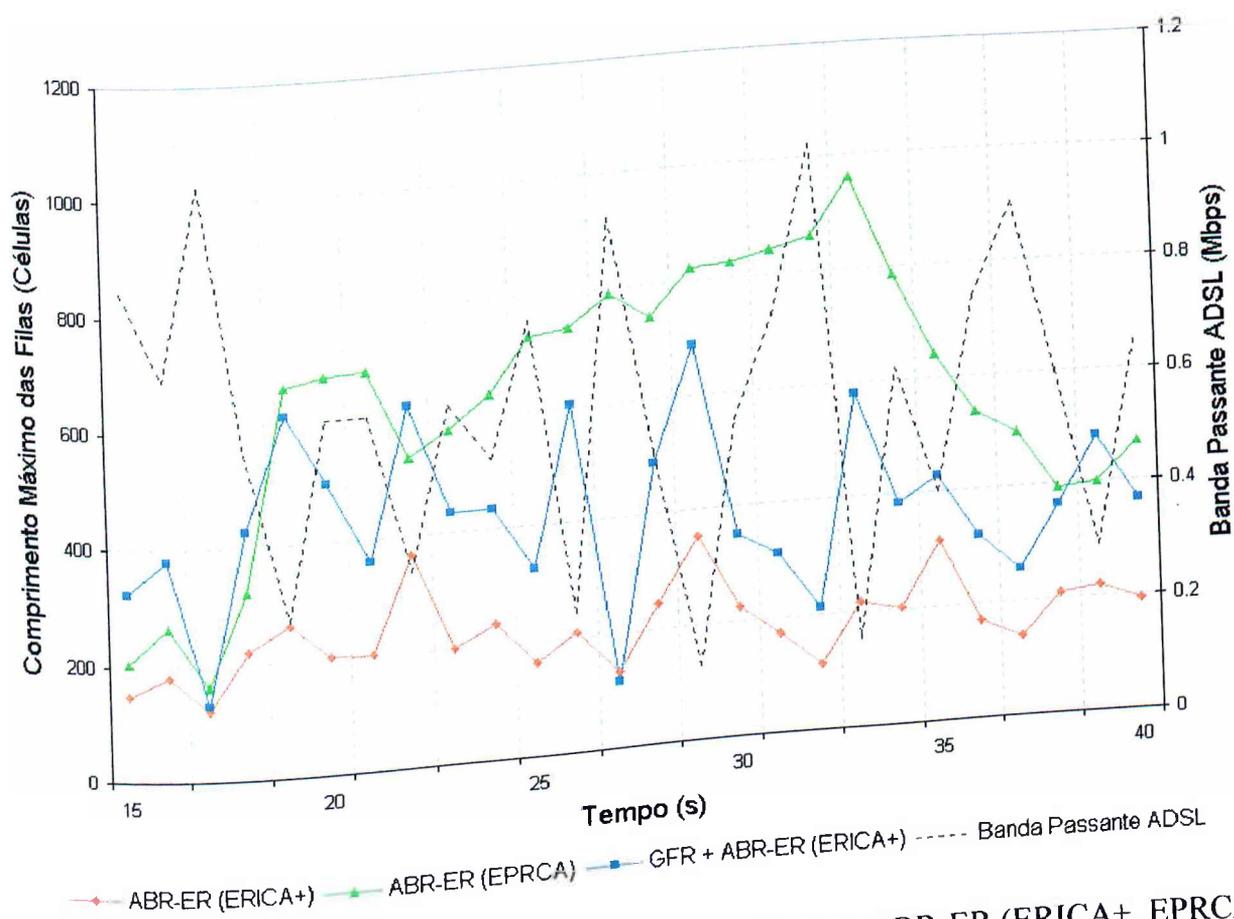


Figura 4.4 (a) Nível de Ocupação dos *Buffers* para as Técnicas ABR-ER (ERICA+, EPRCA) e GFR + ABR-ER (ERICA+)

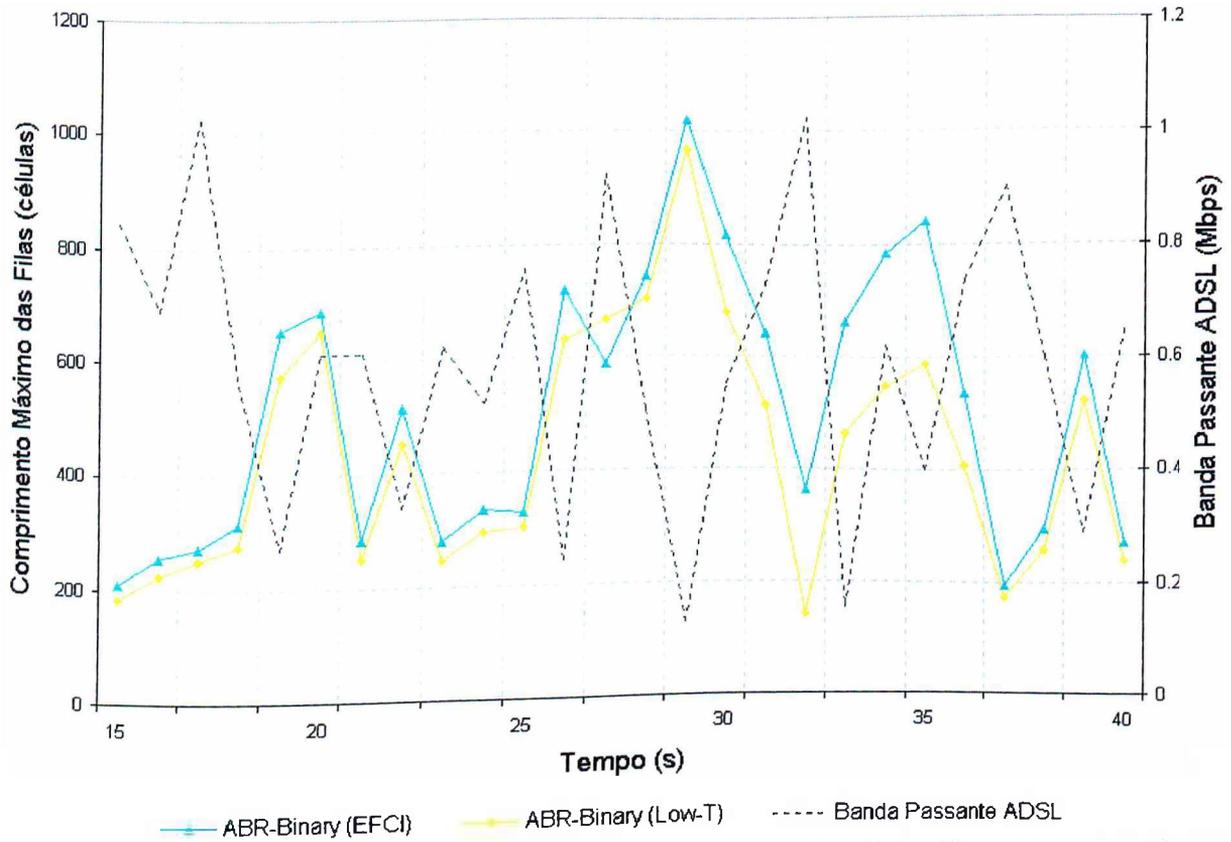


Figura 4.4 (b) Nível de Ocupação dos *Buffers* para as Técnicas ABR-Binary e ABR-Binary (Low-T).

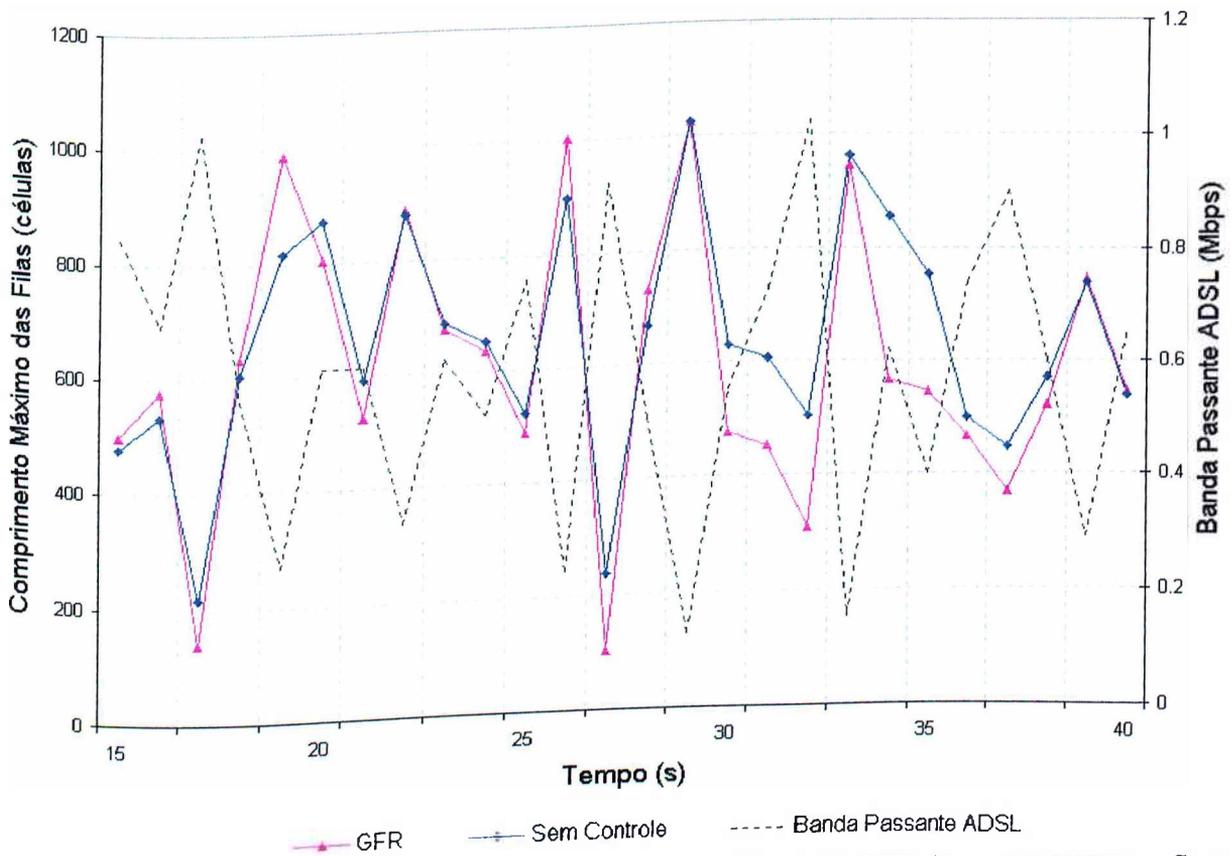
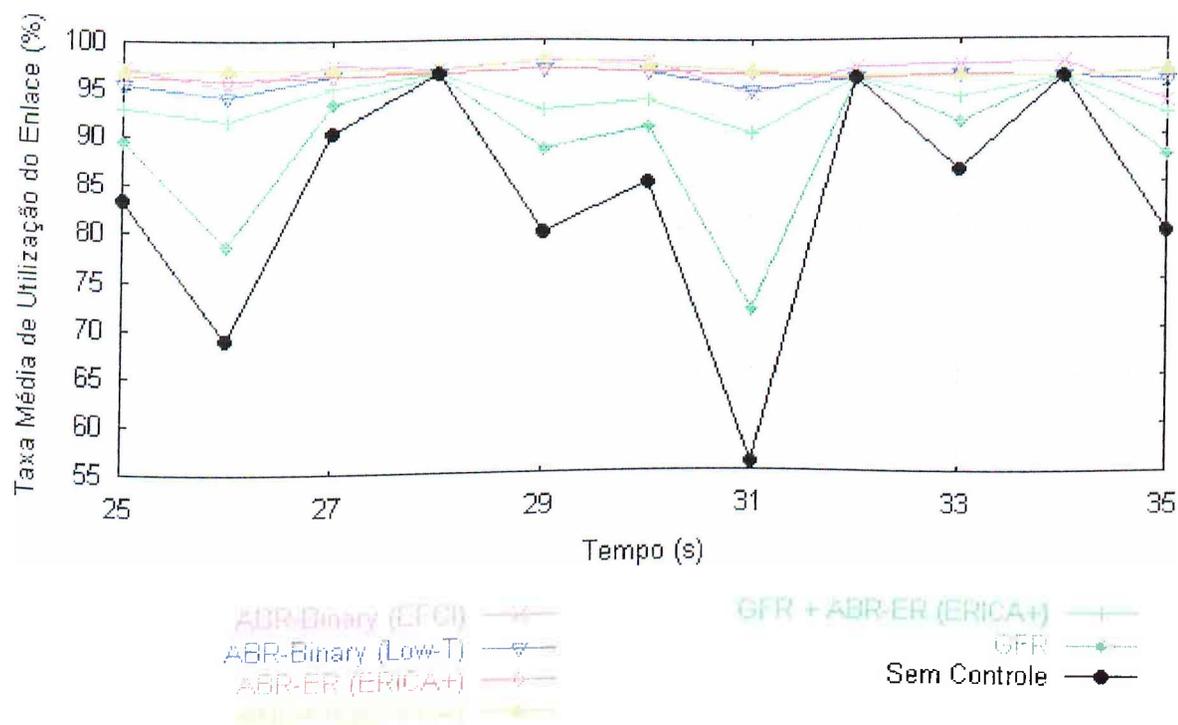


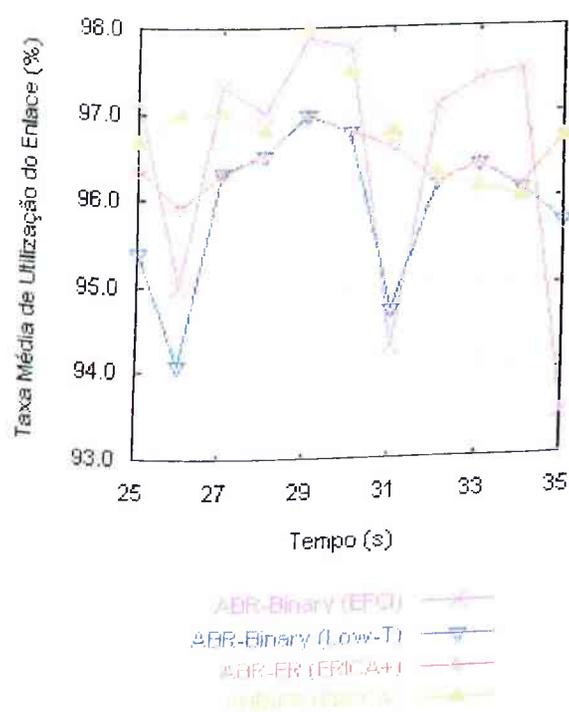
Figura 4.4 (c) Nível de Ocupação dos *Buffers* para as Técnicas GFR (Per-VC-WRR) e Sem Controle.

Com relação às técnicas *ABR-Binary* (EFCI) e *ABR-Binary* (Low-T), apresentadas na figura 4.4-b, percebe-se que o emprego da implementação Low-T, que corresponde à redução do limite para a detecção de congestionamentos, apresentou um melhor desempenho no que diz respeito ao gerenciamento do nível de ocupação dos *buffers*, que a implementação original, uma vez que o nível mais baixo apresentado por ela resultou na redução do atraso de enfileiramento, embora tal redução não tenha representado um melhor desempenho em termos de vazão (figura 4.2-b). Isto se deve à redução da taxa de emissão de células apresentada pela técnica Low-T, em função da redução da ACR. Por fim, considerando-se o controle realizado pela técnica Per-VC-WRR (figura 4.2-c), utilizada na implementação da categoria GFR, nota-se um aumento do atraso de enfileiramento e do nível de descarte de células realizado pelo mecanismo FBA, o que provocou o aumento do número de retransmissões de pacotes realizado pelo controle TCP, contribuindo decisivamente para o baixo desempenho apresentado por esta categoria em termos da vazão alcançada para o TCP.

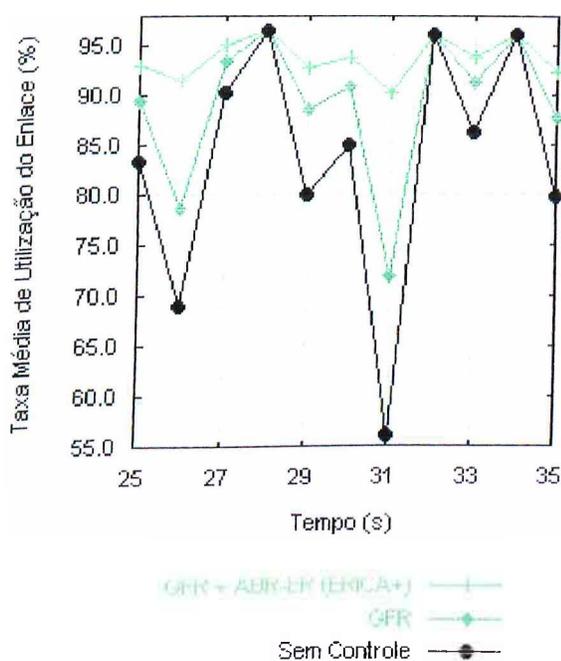
A figura 4.5 mostra a taxa média de utilização do enlace para as técnicas de controle empregadas, bem como na ausência destas técnicas, para o intervalo de simulação entre 25 e 35 s. Observando-se a figura 4.5-b, que destaca as técnicas de controle ABR empregadas, percebe-se que a taxa média de utilização do enlace ficou acima de 90 % para todas as técnicas, graças ao emprego do controle de fluxo realizado pela categoria ABR, o qual visa a máxima utilização da banda passante disponível no enlace [16]. A elevada taxa de utilização apresentada pela técnica ABR-ER que utiliza o algoritmo EPRCA em relação ao emprego do algoritmo ERICA+, é resultado da manutenção da ACR por intervalo de tempo relativamente extenso em um patamar igual à PCR. No caso da técnica *ABR-Binary*, a implementação Low-T apresentou menor índice de utilização da banda que a implementação original, devido à detecção mais rápida das variações na banda.



(a) Taxa Média de Utilização para o Fluxo *Upstream* utilizando-se as Técnicas ABR_Binary (original e Low-T), ABR-ER (ERICA+ e EPRCA), GFR, GFR + ABR e Sem Controle



(b) Taxa Média de utilização para o Fluxo *Upstream* utilizando-se as Técnicas ABR-Binary (original e Low-T) e ABR-ER (ERICA+ e EPRCA)



(c) Taxa Média de utilização para o Fluxo *Upstream* utilizando-se as Técnicas GFR + ABR, GFR e Sem Controle

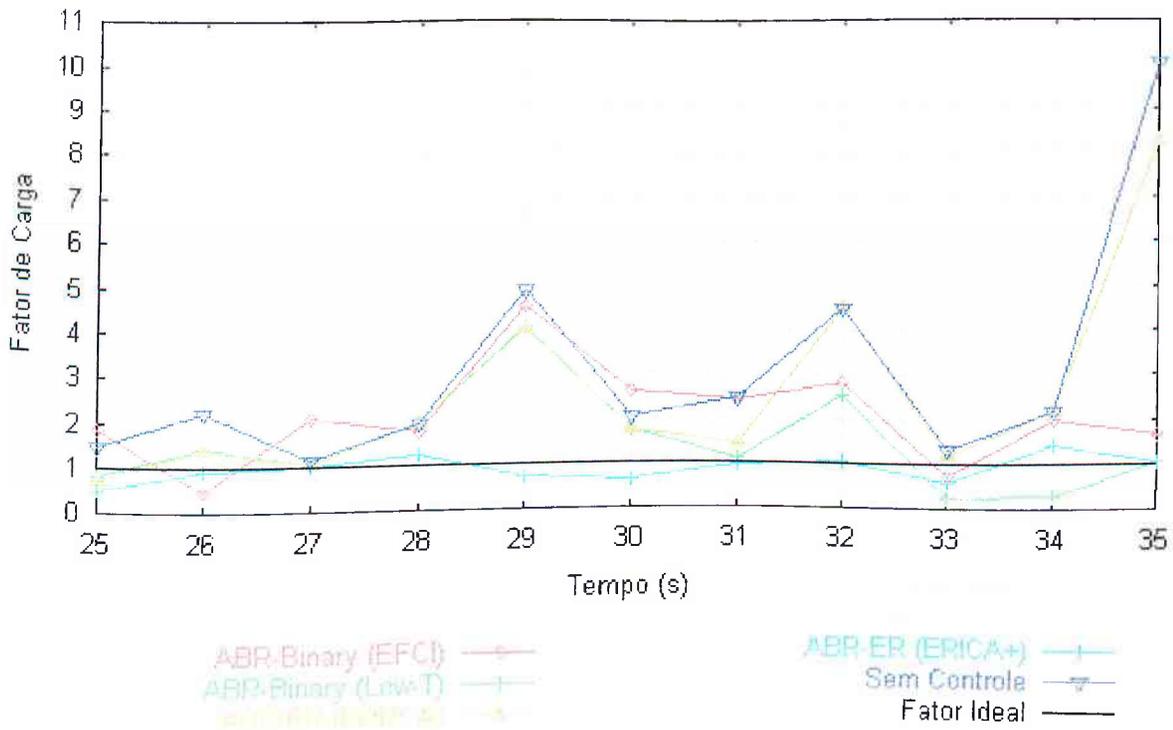
Figura 4.5. Taxa Média de Utilização para o Fluxo *Upstream*.

A figura 4.5-c compara a implementação da categoria GFR utilizando-se a técnica Per-VC-WRR com sua implementação utilizando-se um mecanismo de controle ABR e quando não se utiliza qualquer tipo de controle. Nota-se que a ausência de um controle de tráfego que permita uma eficiente utilização da banda passante compromete o nível de utilização do enlace uma vez que a taxa de utilização apresentada pela categoria GFR e sem a utilização de qualquer controle está abaixo daquela observada quando a categoria GFR foi implementada utilizando-se um mecanismo de controle ABR.

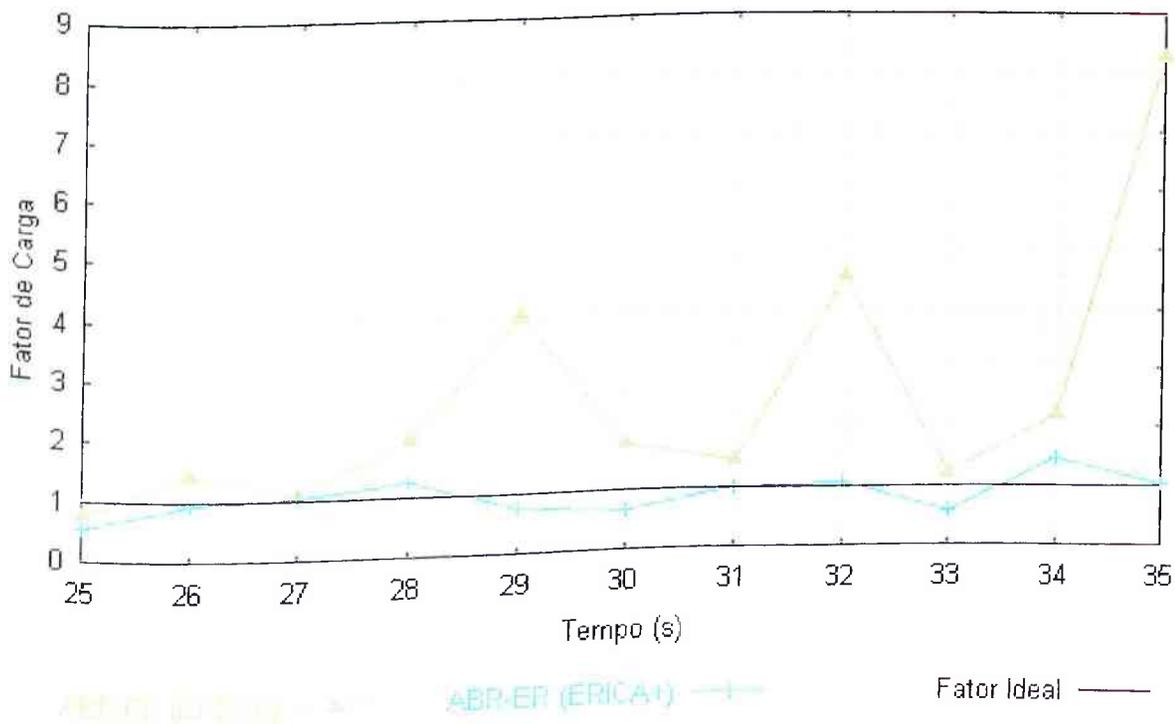
O nível de congestionamento anteriormente mencionado pode ser medido através do fator de carga (Z) apresentado na equação 3.7 do capítulo 3. A figura 4.6 apresenta este nível para as técnicas de controle empregadas e também sem o uso de tais técnicas.

Considerando-se o fator de carga ideal ($Z = 1$), percebe-se através da figura 4.6-a que a exceção da técnica ABR-ER que utiliza o algoritmo ERICA+, o comportamento do fator de carga indica que o enlace está constantemente sobrecarregado, devido à falta de equilíbrio apresentada entre a taxa de emissão de células e a capacidade de transmissão do enlace, a qual é função da taxa média de utilização e da banda passante disponível no referido enlace. Observando-se a figura 4.6-b, que destaca o comportamento dos algoritmos EPRCA e ERICA+, fica evidente que o controle da taxa de emissão de células é de fundamental importância para a manutenção de um adequado nível de utilização do enlace, haja visto que o algoritmo ERICA+ ao realizar o referido controle apresentou variações do fator de carga em torno do seu valor ideal.

Outra importante observação a ser feita baseando-se nos resultados obtidos diz respeito ao comportamento da janela de congestionamento (CWND). Analisando-se a figura 4.7, que mostra as variações da CWND para o intervalo de simulação de 11 a 15 s e $T_{upstream} = 0,1$ s, constata-se que apesar do emprego das técnicas de controle de tráfego, a vazão do TCP foi afetada pela variação da banda passante no enlace ADSL, uma vez que



(a) Fator de Carga para o Fluxo *Upstream* utilizando-se as Técnicas ABR_Binary (original e Low-T), ABR-ER (ERICA+ e EPRCA) e Sem Controle



(b) Fator de Carga para o Fluxo *Upstream* utilizando-se as Técnicas ABR-ER (ERICA+ e EPRCA)

Figura 4.6. Fator de Carga para o Fluxo *Upstream*.

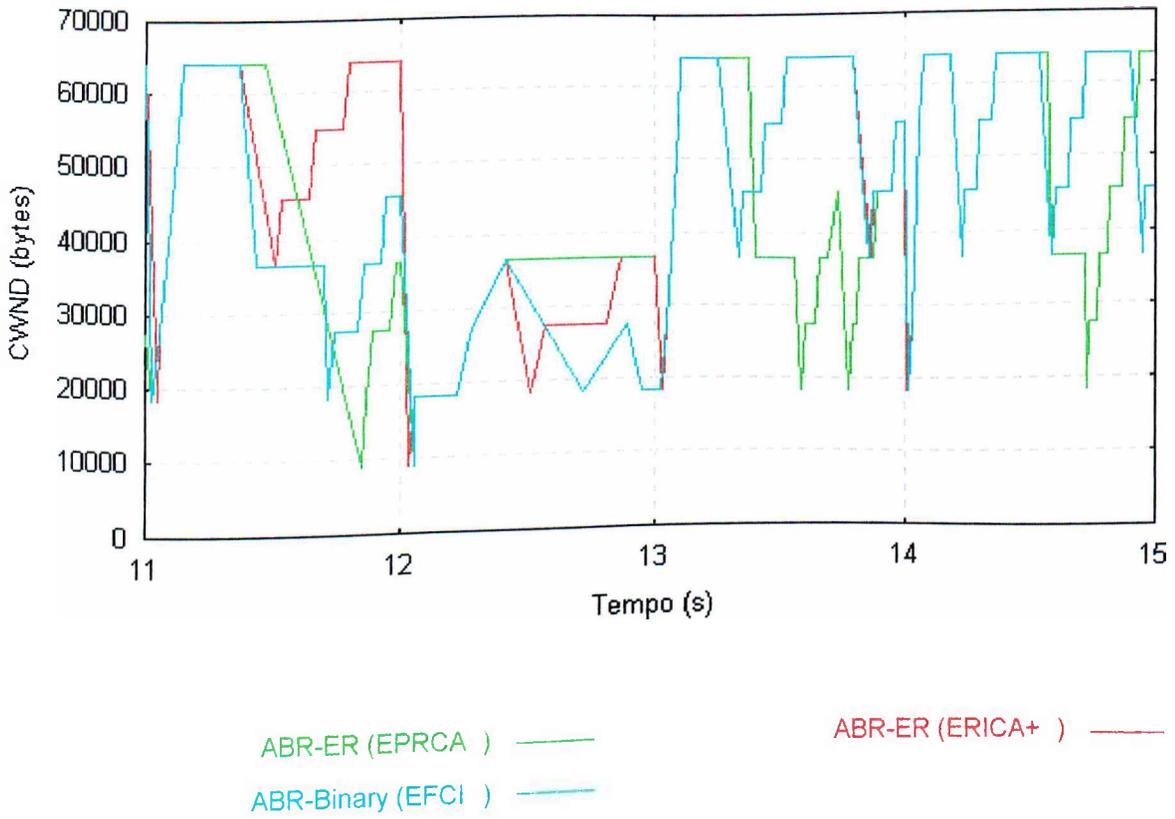


Figura 4.7 (a) CWND para o Fluxo *Upstream*.

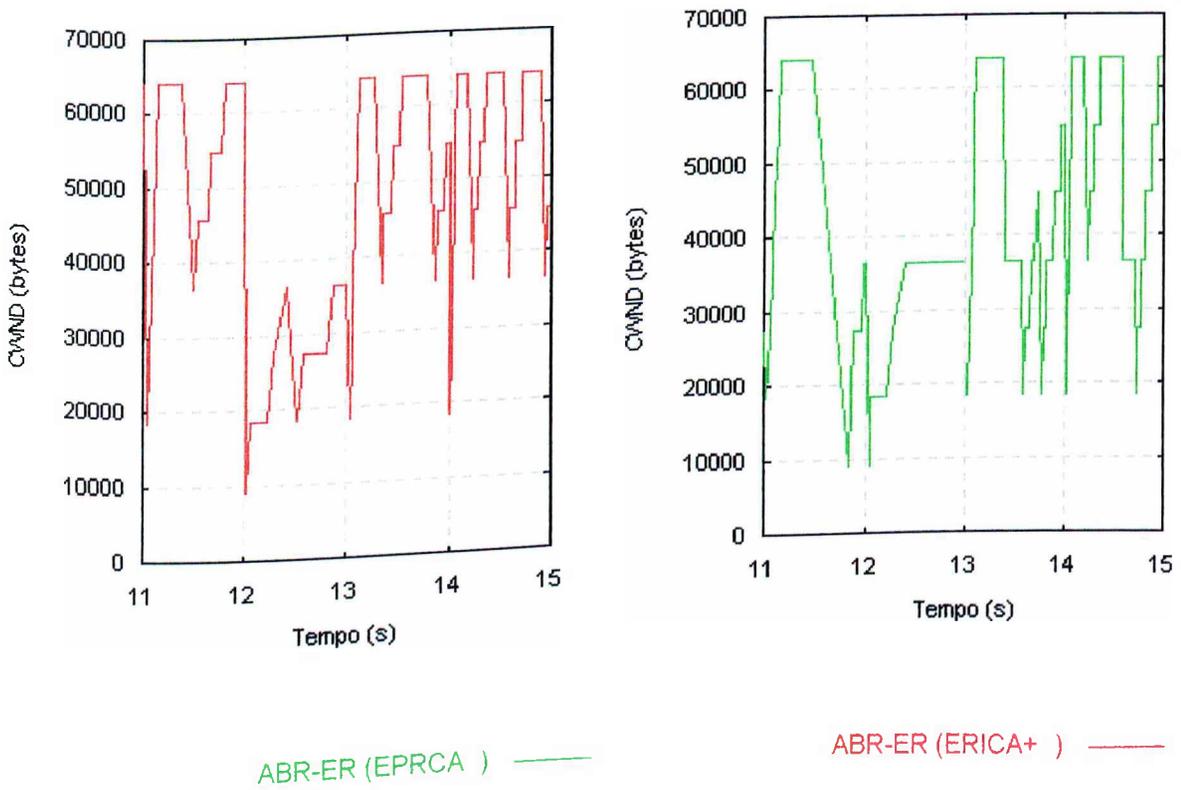


Figura 4.7 (b) CWND ABR-ER (ERICA+) e ABR-ER (EPRCA).

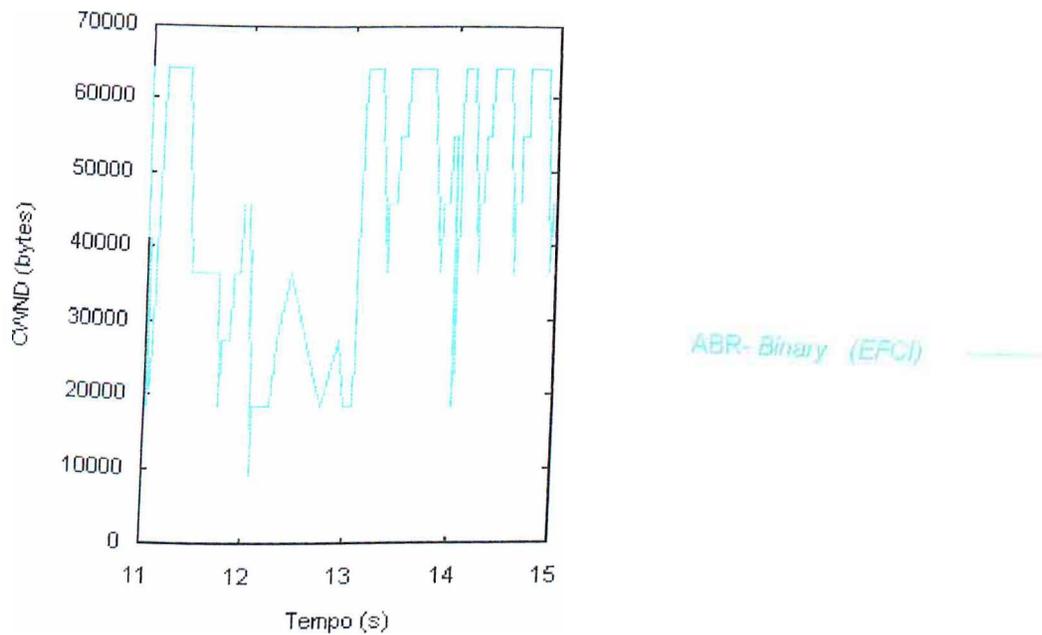


Figura 4.7 (c) CWND ABR-Binary.

foram constantes as alterações dos valores da CWND. De forma mais específica, quando a banda foi reduzida, ocorreu atraso dos ACKs (*timeout*) e, como consequência do protocolo de controle de congestionamento TCP empregado (TCP Reno), a CWND foi reduzida. Esta redução no tamanho da CWND ocasionou a retransmissão de dados e, por conseguinte, a redução da vazão alcançada. As figuras 4.7-b e 4.7-c mostram separadamente, o comportamento destas variações para as técnicas empregadas para o controle de tráfego ABR.

Por fim, foram realizadas simulações onde se variou o número de VCs ativos, com o objetivo de avaliar o comportamento das técnicas de controle empregadas quando aumenta-se a competição por banda passante.

A figura 4.8 ilustra a vazão do TCP em função do número de VCs ativos, utilizando-se o controle realizado pelas categorias ABR e GFR, bem como a implementação dos serviços GFR utilizando-se um mecanismo de controle ABR.

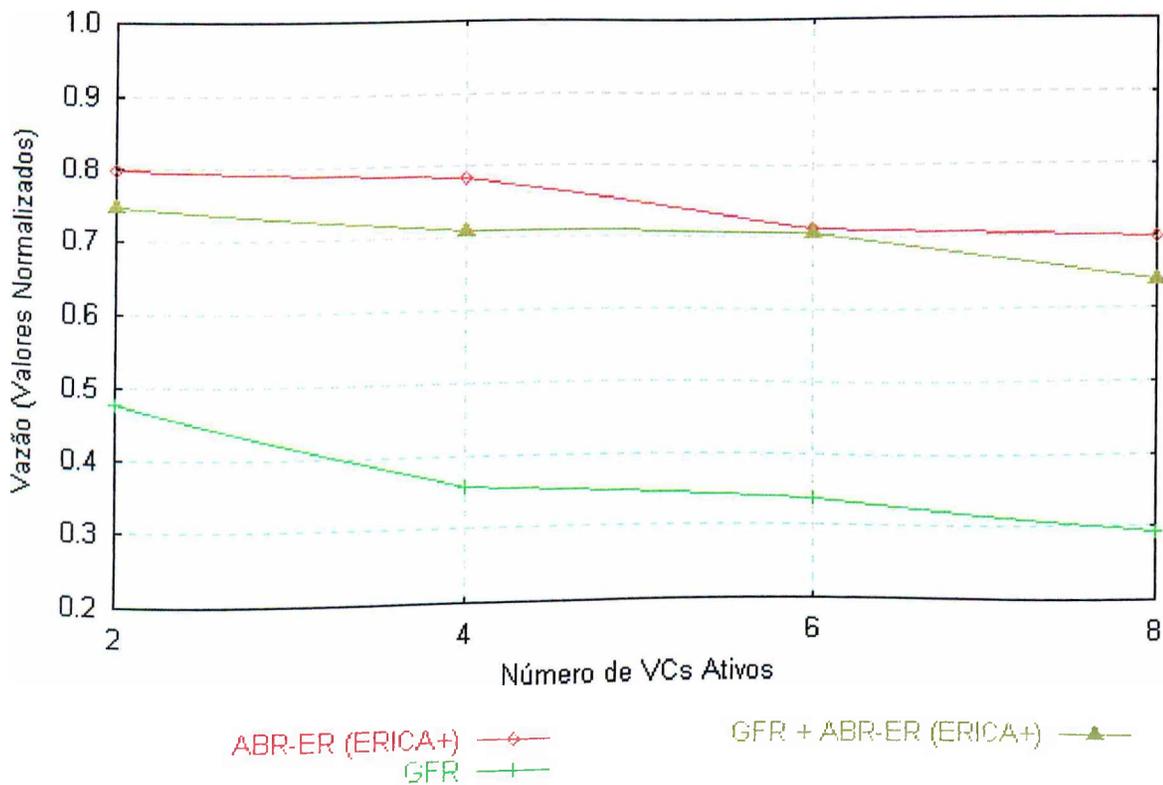


Figura 4.8. Vazão do TCP em função do Número de VCs Ativos para $Tupstream = 1s$.

Através da figura 4.8, percebe-se que a categoria de serviço ABR apresentou o melhor desempenho em termos de vazão alcançada pelo TCP, enquanto que a utilização da categoria GFR utilizando-se um mecanismo de controle ABR, apresentou um desempenho bem acima do observado para a categoria GFR (Per-VC-WRR), que apresentou um desempenho semelhante ao alcançado quando não se utilizou qualquer tipo de controle. Mais uma vez, isto se deve a ineficiente taxa de utilização da banda passante do enlace ADSL.

O nível de justiça, ou *fairness*, no compartilhamento da banda passante no enlace, calculado a partir da equação 4.2, é mostrada na figura 4.9. Nota-se que ao contrário dos resultados obtidos para a vazão, neste caso, a categoria GFR apresenta o melhor desempenho, sendo acompanhada de perto pela implementação da categoria GFR utilizando-se um mecanismo de controle ABR, devido ao emprego em ambas as implementações, de

mecanismos que promovem o descarte seletivo de pacotes, resultando na justa distribuição dos recursos entre os VCs. Com relação à categoria ABR, o desempenho em termos da justiça (*fairness*) entre os VCs é também satisfatório, devido sobretudo ao eficiente controle da taxa de emissão de células realizado por esta categoria [25].

$$Fairness = \frac{(\sum x_i)^2}{(n * \sum x_i^2)} \quad (4.2)$$

onde x_i corresponde a vazão de cada fonte TCP ativa e n corresponde ao número de fontes TCP ativas.

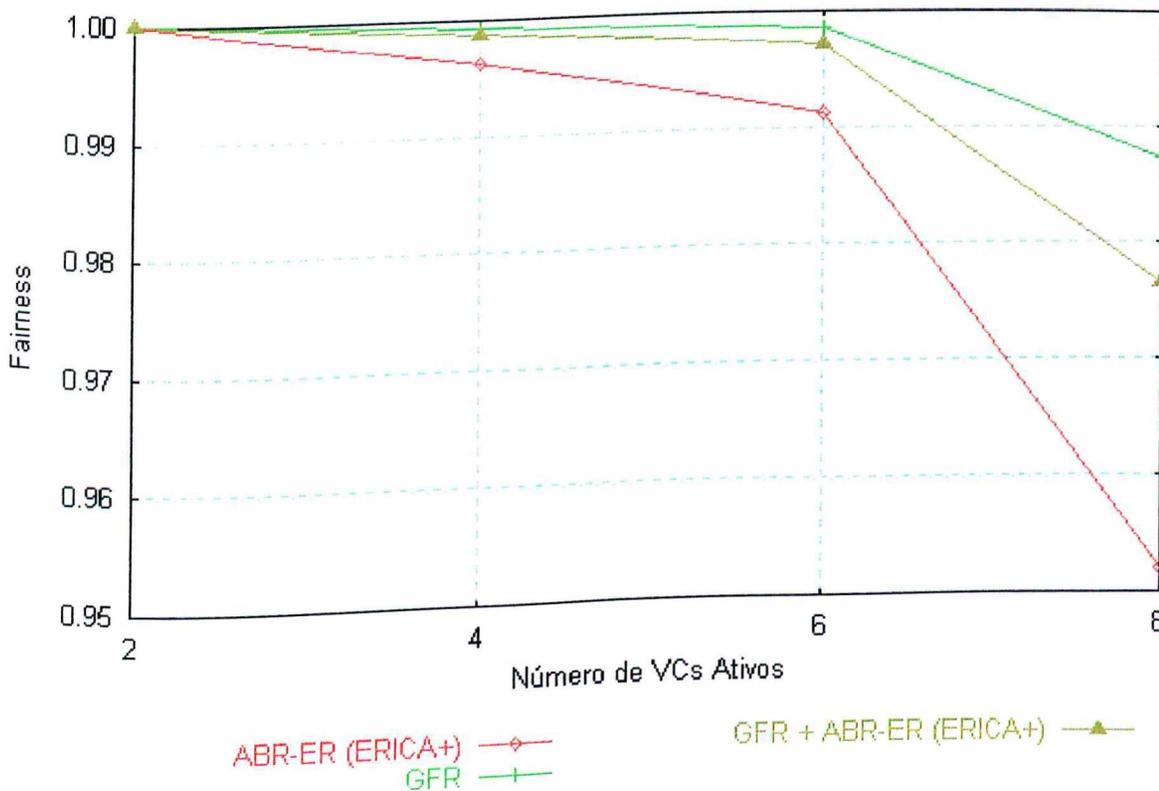


Figura 4.9. Nível de Justiça entre os VCs para *Tupstream* = 1 s.

Vale ressaltar que, o aumento do número de VCs ativos provoca a redução da justiça (*fairness*) entre os VCs, em função do aumento da competição pela banda passante disponível [50].

Outro fator responsável pela redução da justiça (*fairness*) entre os VCs e também da vazão alcançada pelo TCP, quando aumenta-se o número de VCs ativos, é o aumento do nível de ocupação dos *buffers*, como mostra a figura 4.10.

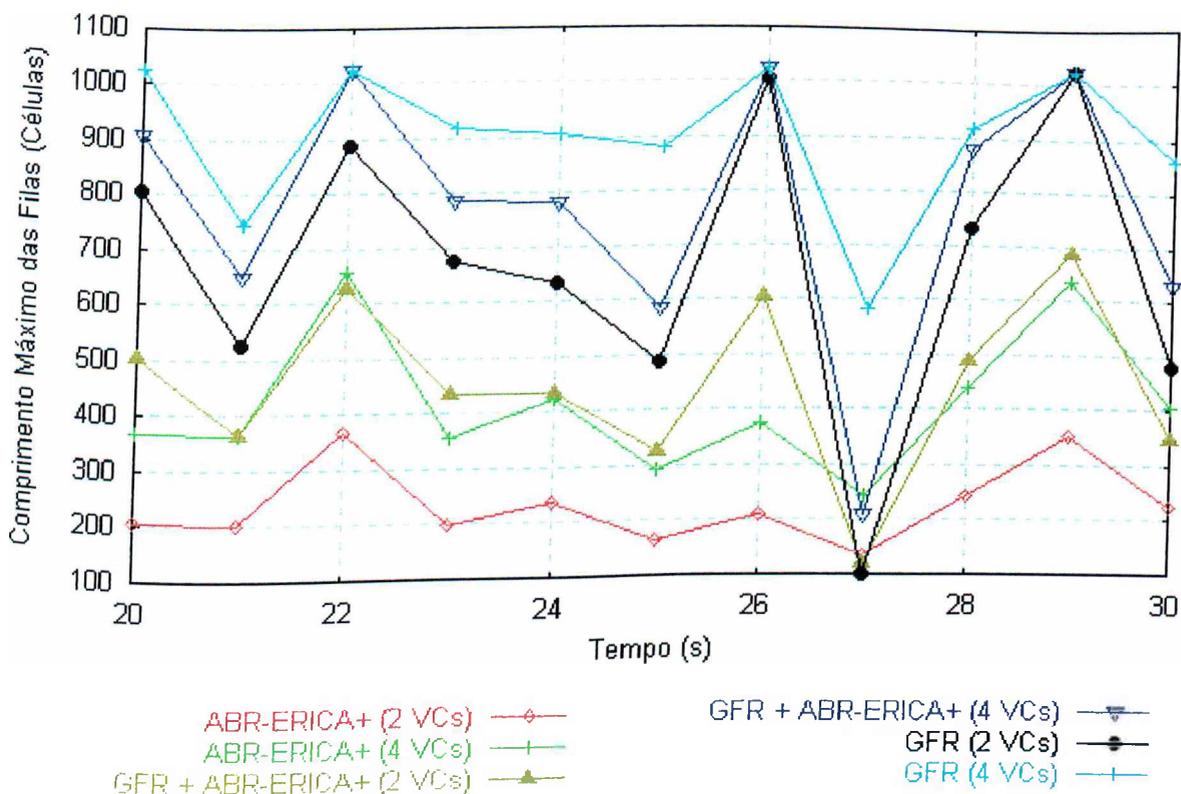


Figura 4.10. Nível de ocupação dos *Buffers* para o Fluxo de Dados *Upstream*.

4.4.2. Desempenho Obtido para o Fluxo *Downstream* (Condição 2)

Para o fluxo de dados *downstream*, o controle ABR apresenta um melhor desempenho ao lidar com as variações de longo prazo (1, 3 e 10 s), como mostra a figura 4.11, que representa a vazão alcançada pelo TCP para o referido fluxo de dados. Este comportamento é

devido à rápida resposta do controle de tráfego ABR às variações de banda passante no enlace, o que ocasiona em excessivas alterações no valor da ACR dos TEs fontes. A exceção ao bom desempenho apresentado para a vazão do TCP empregando-se o controle ABR é a técnica ABR-*Binary*, que alcançou um desempenho inferior ao apresentado quando não se utiliza qualquer tipo de controle.

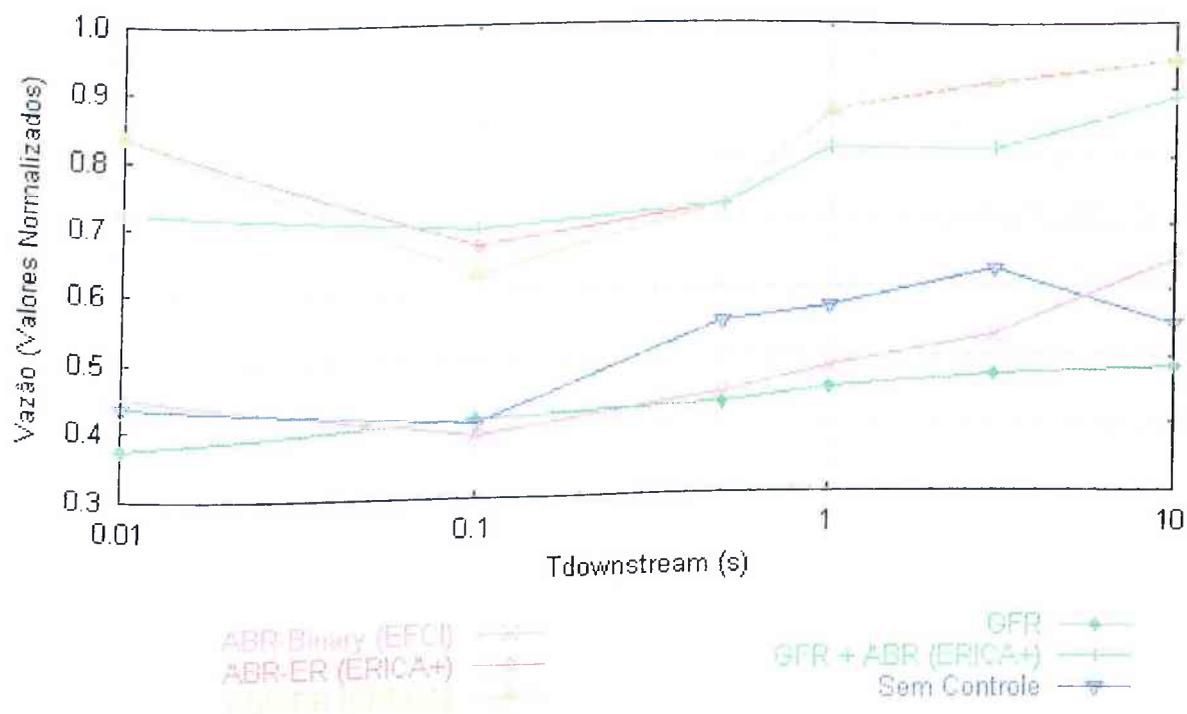


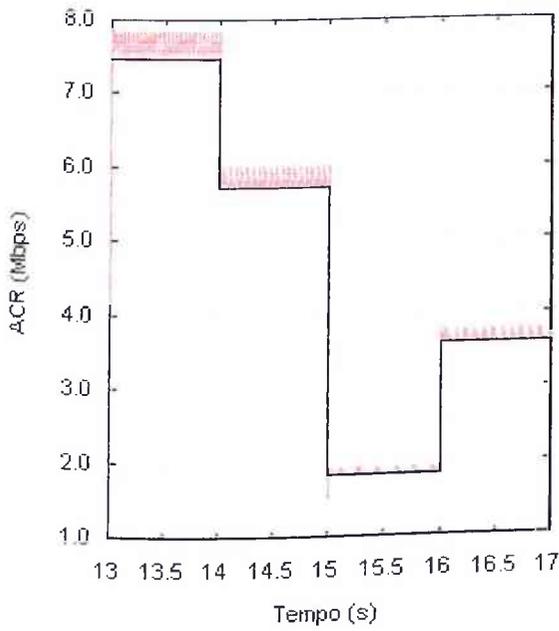
Figura 4.11. Vazão do TCP para o Fluxo *Downstream*.

Como no fluxo *upstream*, utilizando-se os serviços GFR, alcançou-se o melhor desempenho em termos da vazão do TCP para as variações de longo prazo, novamente como resultado do menor índice de descarte de células para estas variações. Contudo, seu desempenho ainda é relativamente baixo em função da ausência de um controle de tráfego que permita uma eficiente utilização da banda passante do enlace ADSL, problema que é resolvido pela implementação desta categoria utilizando-se um mecanismo de controle ABR.

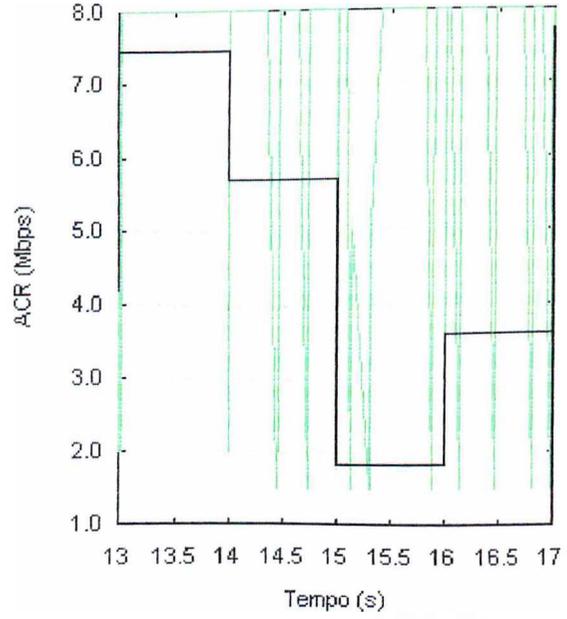
A figura 4.12 ilustra a variação da ACR para as técnicas empregadas pelo controle ABR no intervalo de simulação de 13 a 17 s, com $T_{downstream}$ igual a 1 s. No que diz respeito ao controle ABR que emprega o algoritmo ERICA+, percebe-se que a ACR varia em torno da banda passante no enlace (figura 4.12-b), como resultado da manutenção de um adequado nível de ocupação do *buffer* do switch ATM associado ao ATU-C. De forma mais específica, o comprimento das filas de células nestes *buffers* varia em função do atraso de enfileiramento ideal (T_0).

Considerando-se o emprego do algoritmo EPRCA, percebeu-se que a ACR apresentou um comportamento independente das variações de banda passante do enlace ADSL, com amplitudes variando entre a MCR (1,5 Mbps) e a PCR (8 Mbps), devido ao uso da média ponderada MACR no cálculo da atualização da ACR. Especificamente, a MACR será rapidamente incrementada até que o valor limite para a detecção de estados de congestionamentos no enlace (HT - *High Threshold*) seja ultrapassado. Neste instante, a MACR será reduzida ocasionando a conseqüente redução da ACR até que seu valor se iguale a MCR. Reduzido o estado de congestionamento do enlace, a MACR voltará a ser incrementada, desencadeando-se todo o processo de variação da ACR.

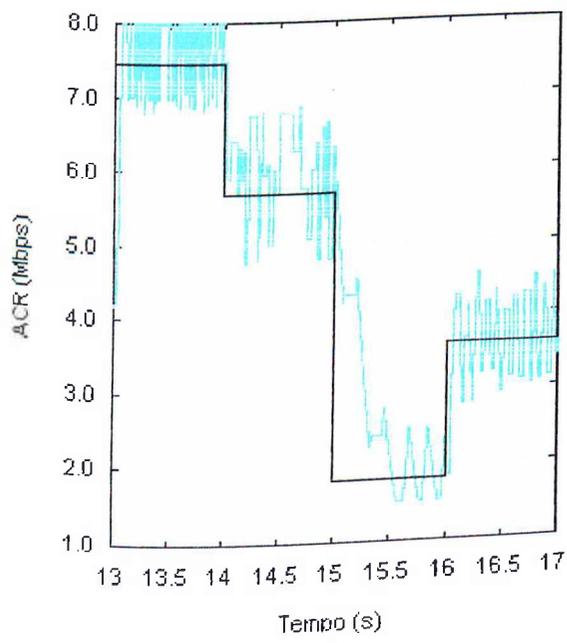
Por fim, com o emprego da técnica ABR-*Binary*, a variação da ACR é resultado da alta sensibilidade desta técnica ao atraso no tempo de resposta do controle. Especificamente, mesmo após a fila de células ultrapassar o limite estabelecido para a detecção de congestionamentos, a ACR continua em seu comportamento atual por alguns instantes, ou seja, ela mantém sua atual tendência. Como conseqüência, a fila de células também mantém o seu comportamento atual, aumentando o atraso de enfileiramento, o que ocasiona o descarte de células.



(a) Variação da ACR para o Fluxo *Downstream* utilizando-se a Técnica ABR-ER (ERICA+)



(b) Variação da ACR para o Fluxo *Downstream* utilizando-se a Técnica ABR-ER (EPRCA)



(c) Variação da ACR para o Fluxo *Downstream* utilizando-se a Técnica ABR-Binary



Figura 4.12. Variação da ACR para o Fluxo *Downstream*.

Como pôde ser observado anteriormente, o nível de ocupação dos *buffers* dos *switches* ATM é de fundamental importância para o controle de tráfego realizado pelas categorias de serviço ABR e GFR. Este nível está apresentado na figura 4.13, em função do número máximo de células enfileiradas a cada segundo de simulação, no intervalo de 15 a 40 s. Nota-se, ao analisar a figura 4.13-a que o gerenciamento dos *buffers* realizado pelo algoritmo ERICA+, baseado no atraso de enfileiramento ideal (T_0), manteve um baixo nível de ocupação, o que não acontece com o algoritmo EPRCA, em função do atraso na detecção das variações da banda passante e com a implementação da categoria GFR utilizando-se um mecanismo de controle ABR em função do emprego do mecanismo EPD. Com relação a figura 4.13-b, observa-se um alto nível de ocupação dos *buffers* para a técnica ABR-*Binary* em decorrência do atraso na detecção das variações na banda e para a categoria GFR devido a utilização do mecanismo FBA.

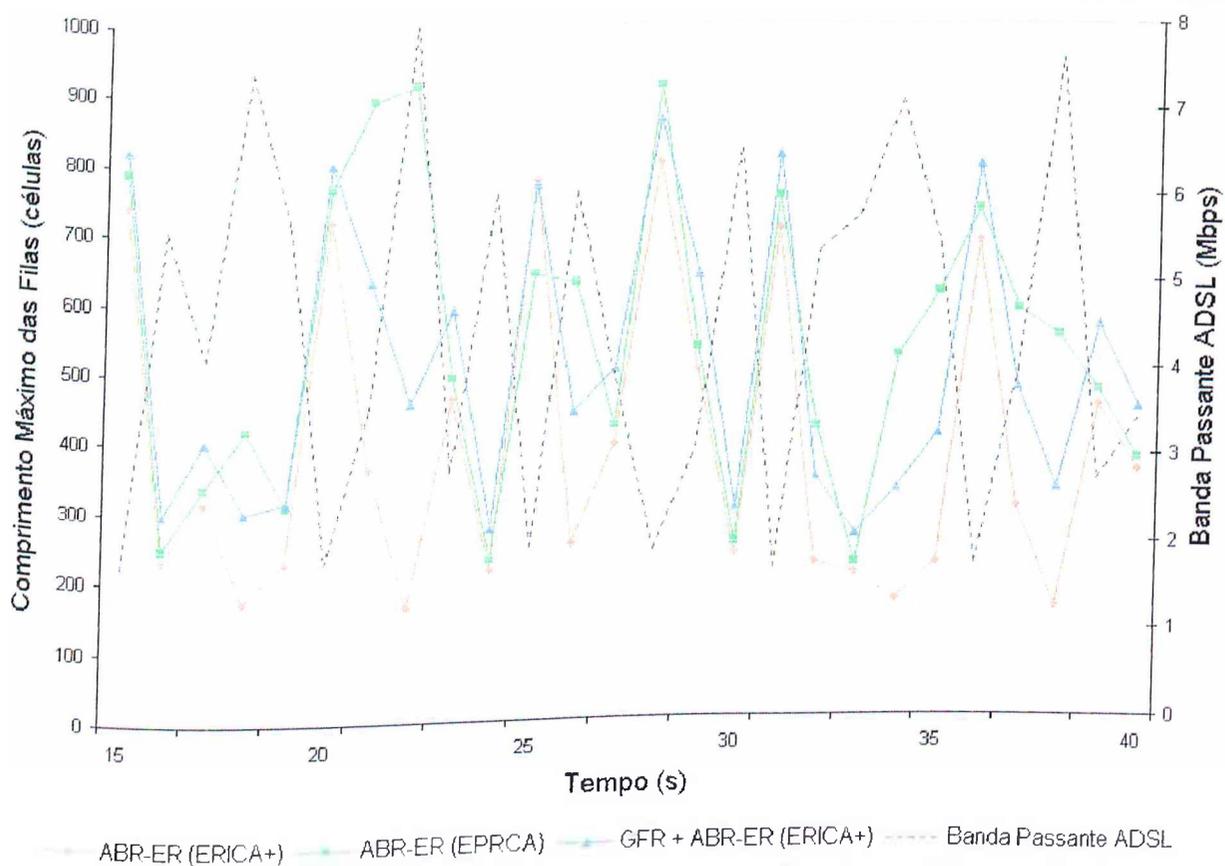


Figura 4.13 (a) Nível de Ocupação dos *Buffers* para as Técnicas ABR-ER(ERICA+ e EPRCA) e GFR+ABR-ER

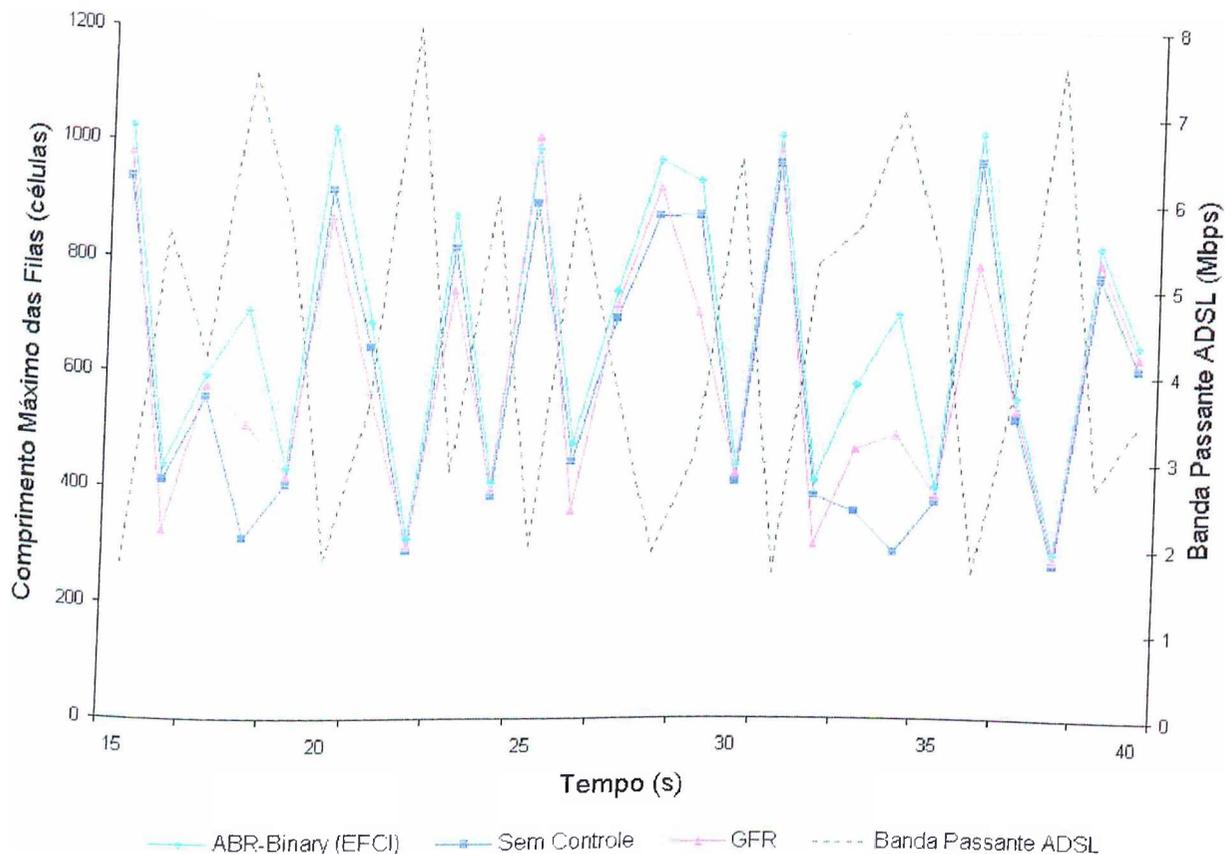


Figura 4.13 (b) Nível de Ocupação dos *Buffers* para as Técnicas *ABR-Binary*, *GFR* e *Sem Controle*

O nível de congestionamento apresentado no enlace pode ser visualizado através da figura 4.14. Nela nota-se que a técnica *ABR-ER* que utiliza o algoritmo *ERICA+* apresentou um maior equilíbrio entre a taxa de emissão de células e a capacidade *ABR*, que o algoritmo *EPRCA*. Isto é reflexo da menor taxa média de utilização apresentada pelo algoritmo *EPRCA* para o fluxo *downstream*. Já com relação à técnica *ABR-Binary*, os baixos valores alcançados para o fator de carga resultam da variação da taxa de emissão de células, uma vez que a taxa média de utilização da banda passante disponível no enlace foi relativamente alta. A figura 4.15 mostra a variação da taxa média de utilização para o intervalo de simulação de 20 a 30 s.

As figuras 4.16-a a 4.16-d mostram o comportamento da *CWND* para o fluxo *downstream*. Nota-se um elevado nível de variação para a *CWND*, o que revela a influência da variação de banda passante nos resultados da vazão alcançada pelo *TCP*.

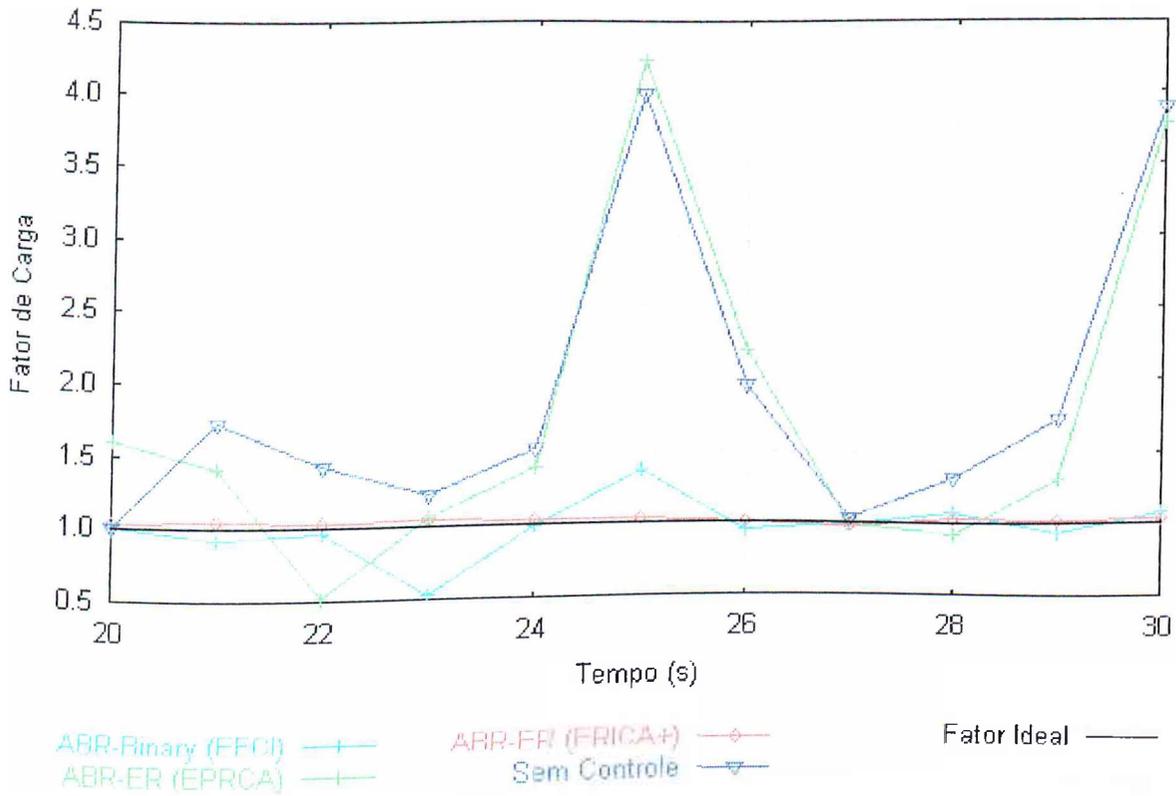


Figura 4.14. Fator de Carga para o Fluxo Downstream.

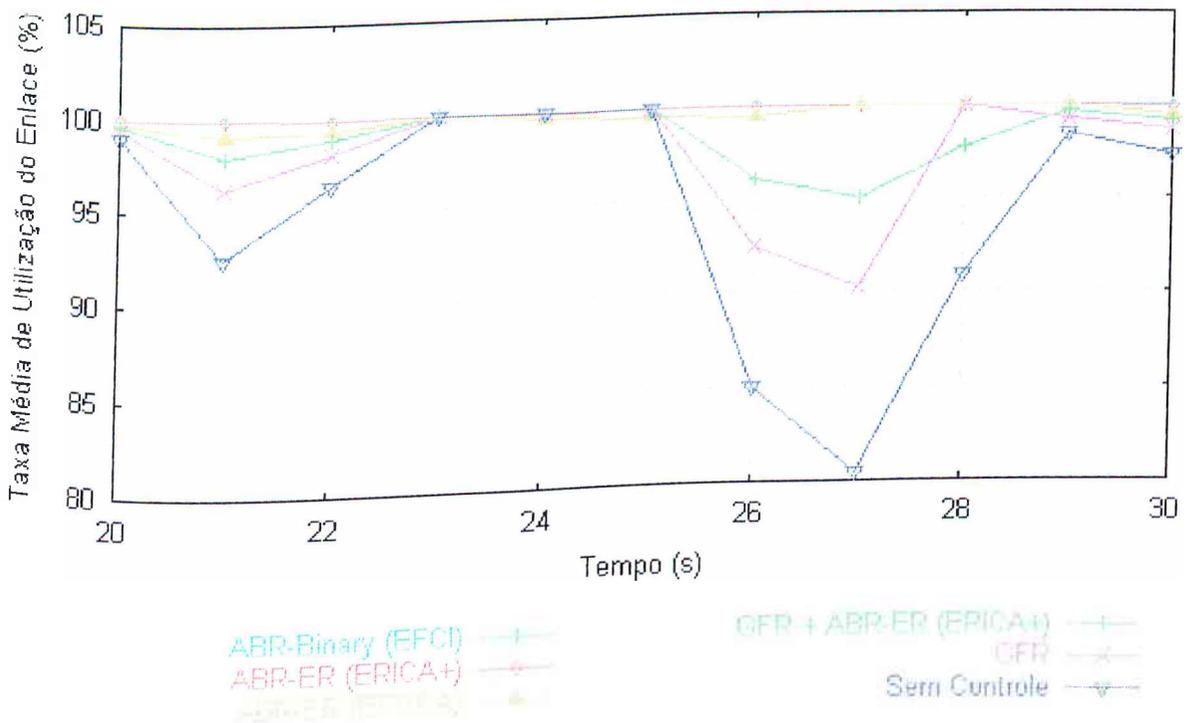


Figura 4.15 (a) Taxa Média de Utilização para o Fluxo Downstream utilizando-se as Técnicas ABR_Binary, ABR-ER (ERICA+ e EPRCA), GFR, GFR + ABR e Sem Controle

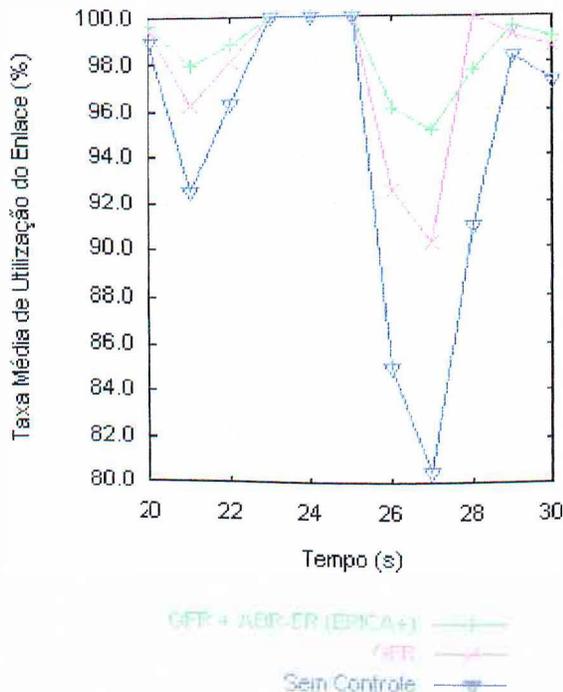
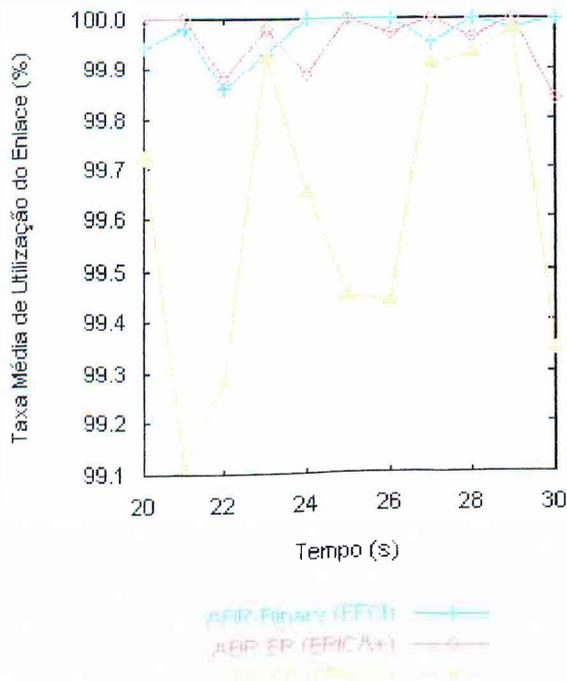


Figura 4.15 (b) Taxa Média de utilização para o Fluxo *Downstream* utilizando-se as Técnicas ABR-*Binary* e ABR-ER (ERICA+ e EPRCA)

Figura 4.15 (c) Taxa Média de utilização para o Fluxo *Downstream* utilizando-se as Técnicas GFR + ABR, GFR e Sem Controle

Figura 4.15. Taxa Média de Utilização para o Fluxo *Downstream*.

Tendo em vista que o emprego do algoritmo ERICA+ apresentou os melhores resultados em termos de vazão que as outras técnicas utilizadas, considerando-se os efeitos da variação na banda passante disponível no enlace ADSL, avaliou-se também os requisitos de armazenagem de células (*buffering*) para este algoritmo.

Através da figura 4.17 que mostra a vazão para o algoritmo ERICA+ com diferentes tamanhos de *buffer*, nota-se que os melhores resultados são alcançados com *buffers* maiores, ou seja, a maior disponibilidade de espaço nos *buffers* permitiu o alcance de um ótimo desempenho em termos de vazão do TCP, independentemente das variações na banda serem de curto ou longo prazo.

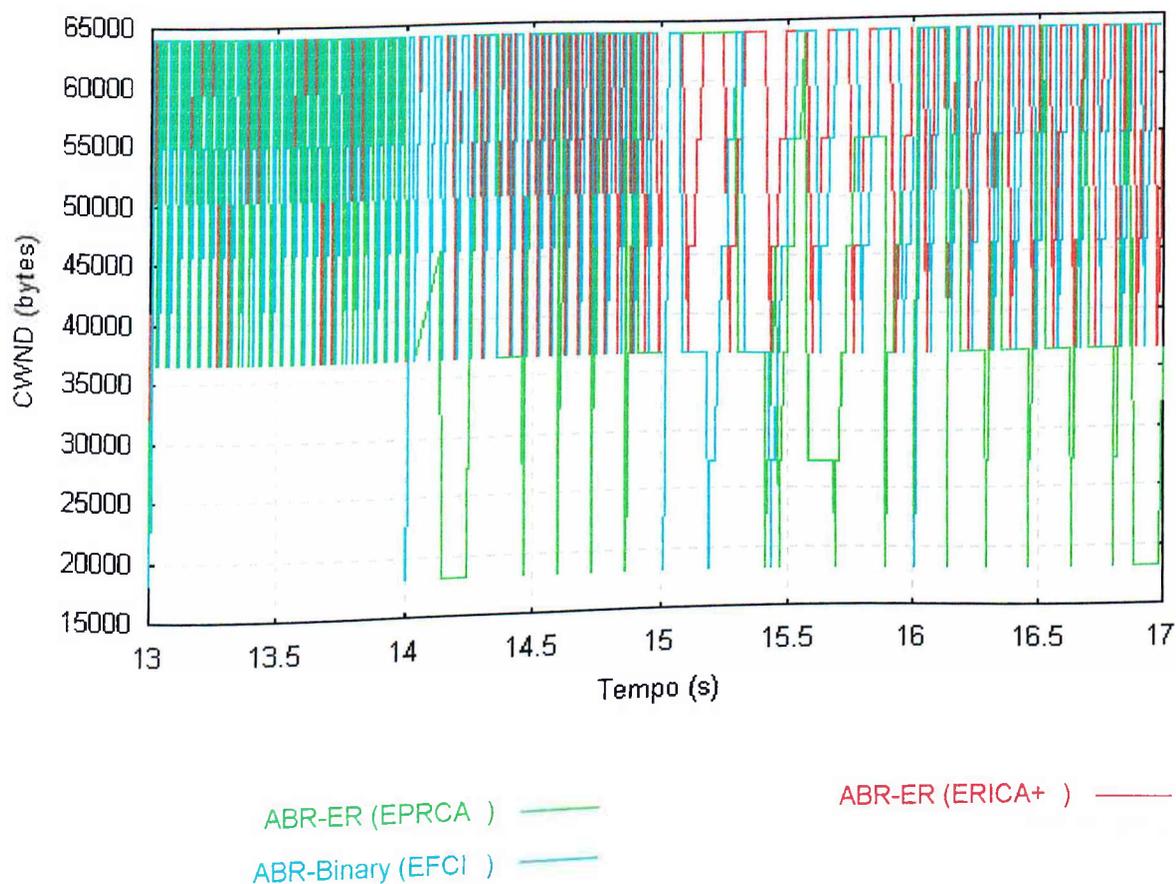


Figura 4.16 (a) CWND para o Fluxo *Downstream* $c/T_{downstream} = 0,1$ s.

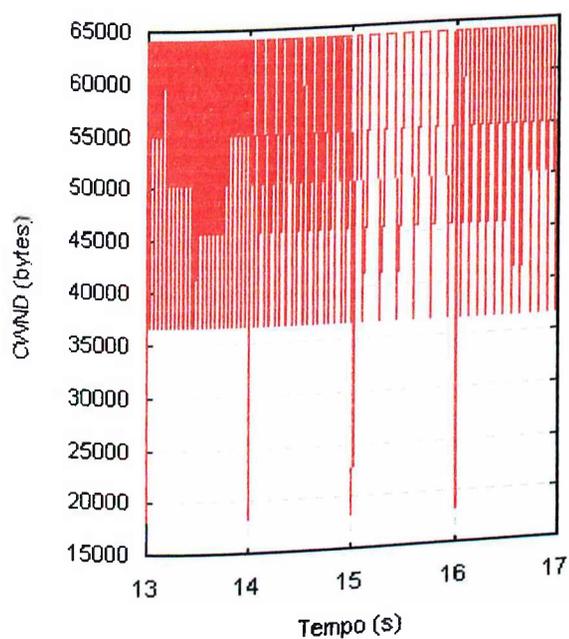


Figura 4.16 (b) CWND para o Fluxo *Downstream* utilizando-se a Técnica ABR-ER (ERICA+)

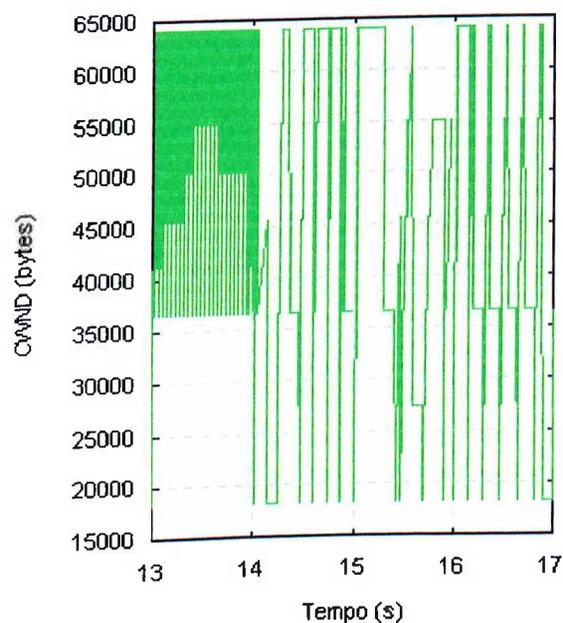


Figura 4.16 (c) CWND para o Fluxo *Downstream* utilizando-se a Técnica ABR-ER (EPRCA)

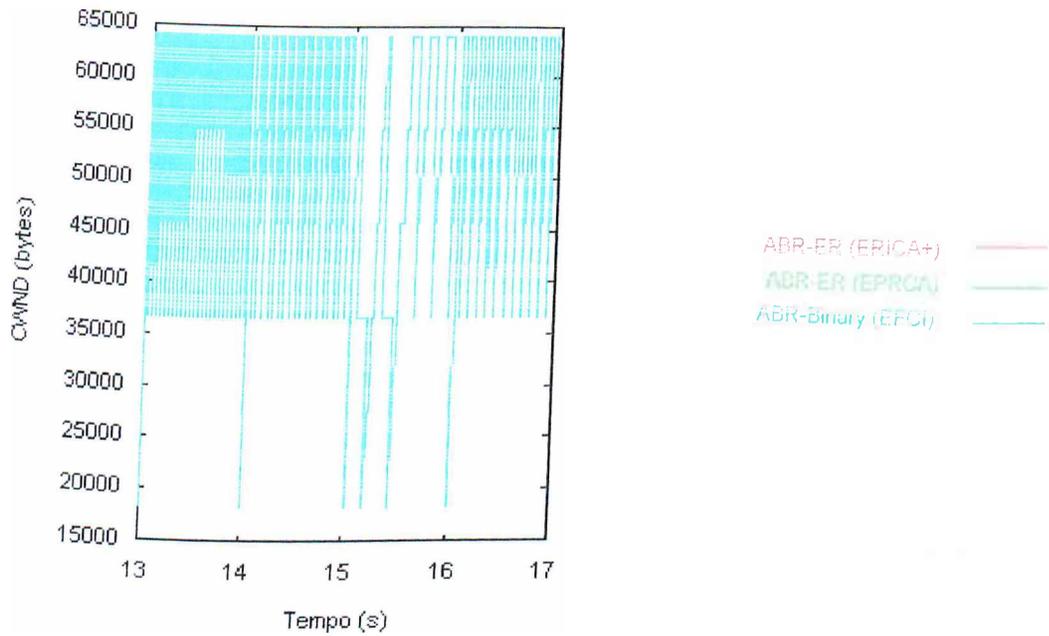


Figura 4.16 (d) CWND para o Fluxo *Downstream* utilizando-se a Técnica ABR-Binary

Figura 4.16. CWND para o Fluxo *Downstream*.

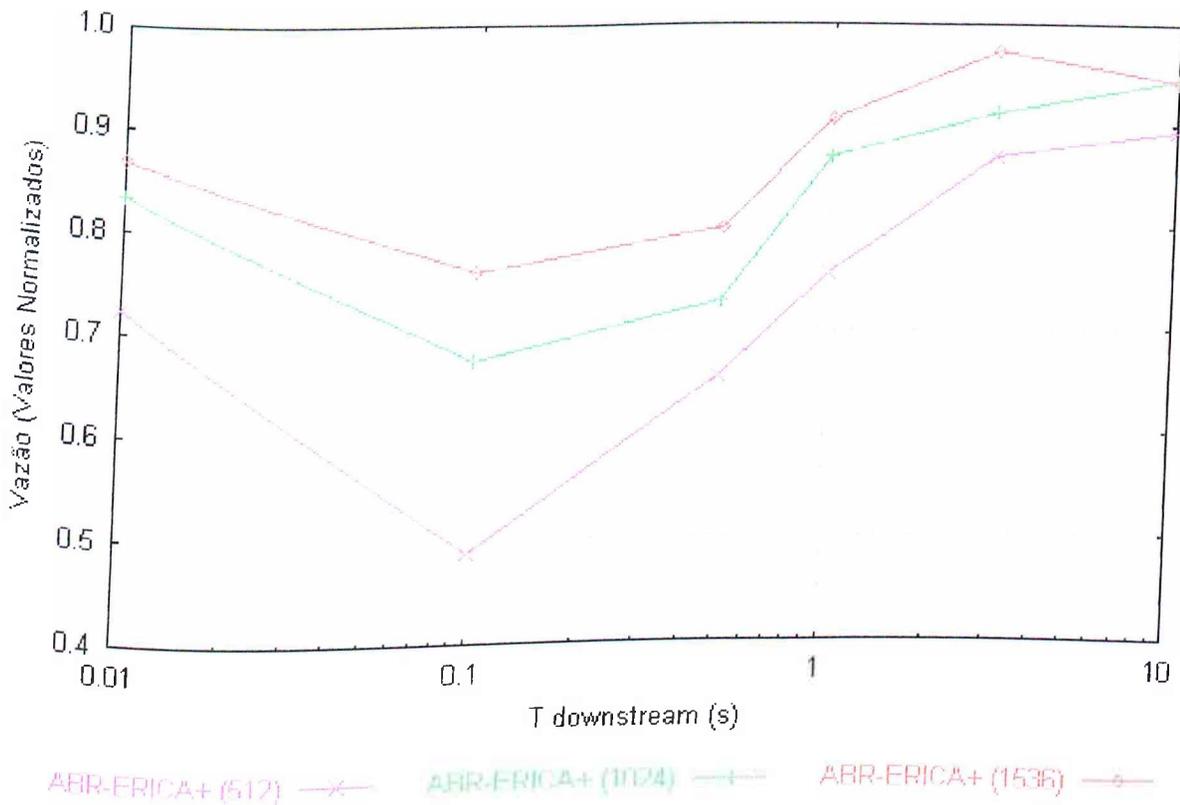


Figura 4.17. Vazão do TCP para Diferentes Tamanhos de *Buffers* para o Fluxo *Downstream*.

Mais uma vez foram realizadas simulações onde se variou o número de VCs ativos. Com relação à vazão alcançada pelo TCP e a justiça (*fairness*) entre os VCs, observou-se o mesmo nível de desempenho no que diz respeito às técnicas de controle empregadas para o fluxo *upstream*, embora com um acréscimo nos referidos valores. Isto se deve à adoção de uma banda passante disponível mais extensa, o que resultou na diminuição do tempo de resposta do controle realizado por tais técnicas. As figuras 4.18 e 4.19 ilustram, respectivamente, a vazão do TCP e o *fairness* entre os VCs.

Como reflexo da adoção de uma banda passante mais extensa, observa-se através da figura 4.20, um nível de ocupação relativamente alto dos *buffers* em função do envio de uma maior quantidade de dados.

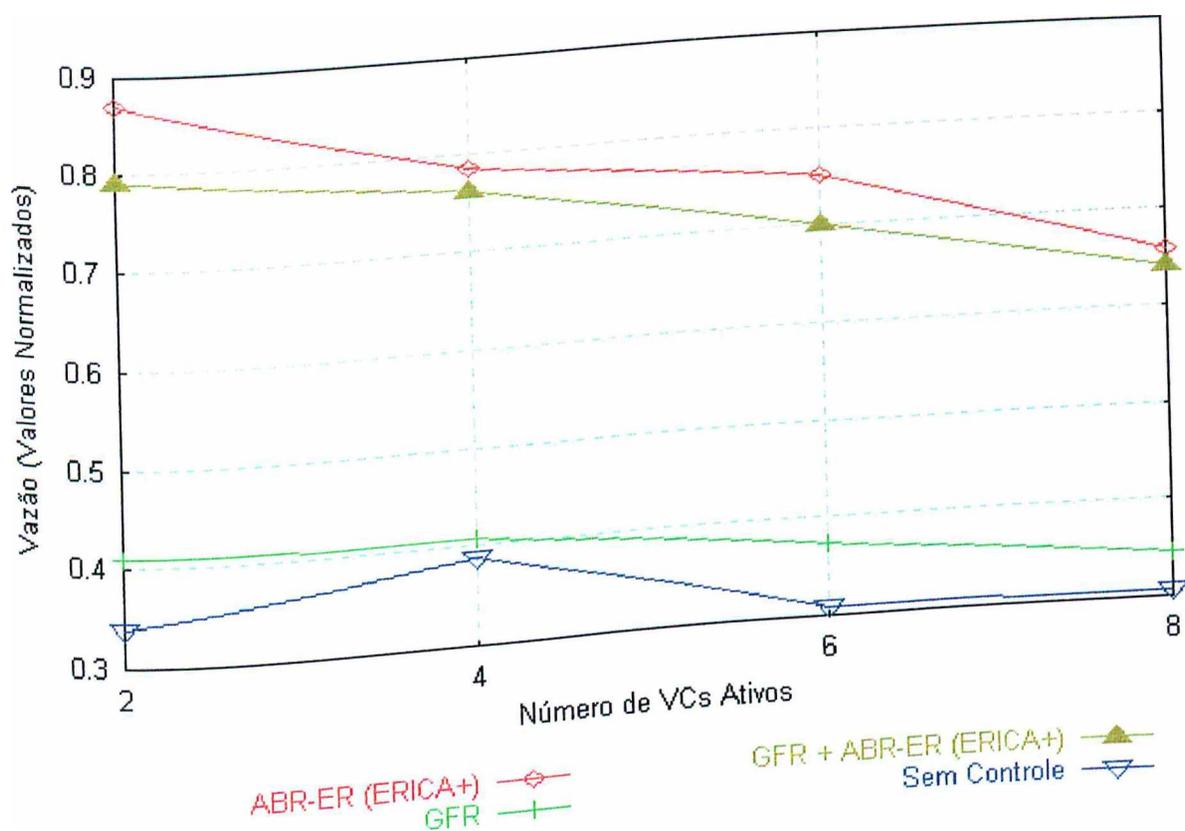


Figura 4.18. Vazão do TCP em função do Número de VCs Ativos para $T_{downstream} = 1$ s.

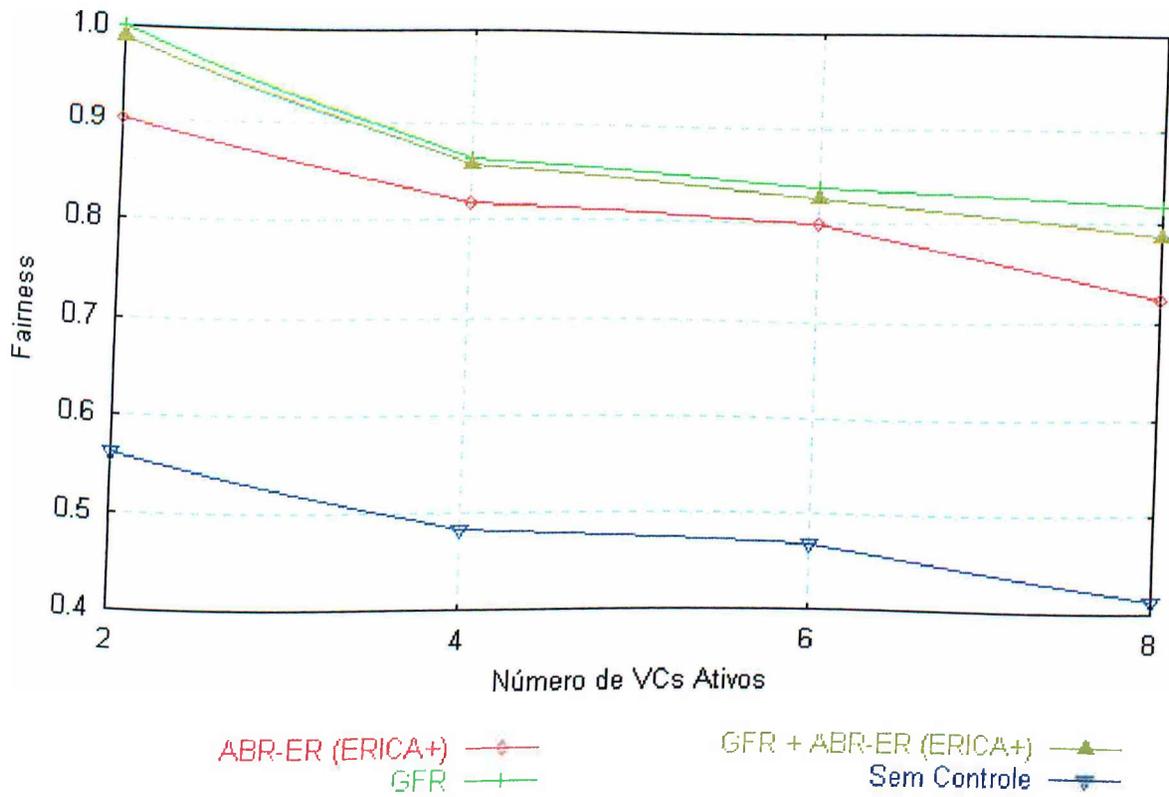


Figura 4.19. Nível de Justiça entre os VCs para $T_{downstream} = 1$ s.

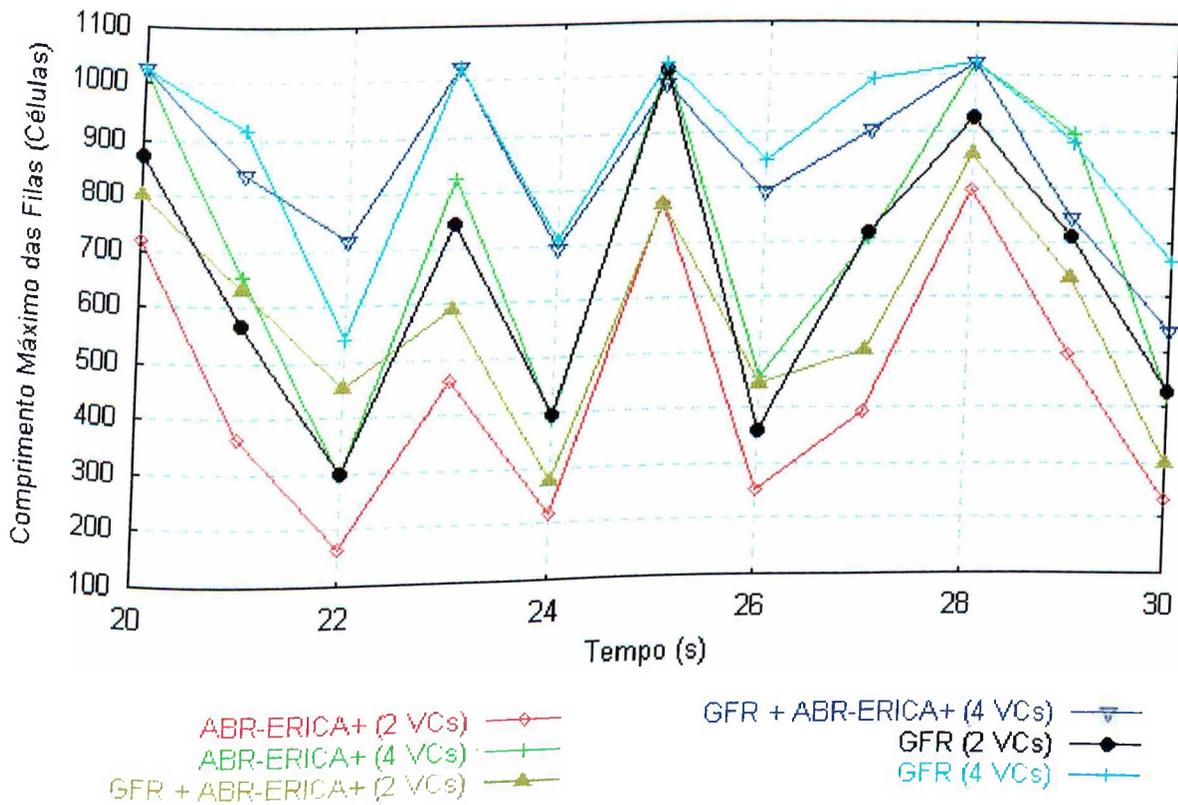


Figura 4.20. Nível de ocupação dos *Buffers* para o Fluxo de Dados *Downstream*

4.5. COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS DE CONTROLE ABR-BINARY, ABR-ER (ERICA+ E EPRCA), GFR (PER-VC-WRR) E GFR UTILIZANDO UM MECANISMO DE CONTROLE ABR

A análise dos resultados obtidos com as simulações do controle de tráfego ATM na minimização das variações de banda passante no enlace ADSL, mostrou que para o fluxo *upstream* as técnicas de controle ABR (ABR-ER e ABR-Binary) apresentaram um alto desempenho em termos de vazão considerando-se principalmente as variações de curto prazo, o que ocorreu em função do atraso na detecção destas variações. No caso das técnicas ABR-Binary e ABR-ER que utilizam o algoritmo EPRCA, as variações na banda passante somente foram detectadas após o nível de ocupação dos *buffers* exceder um determinado limite.

Com relação aos serviços da categoria GFR, obteve-se um melhor desempenho em termos da vazão do TCP para as variações de longo prazo. Isto se deve ao menor índice de descarte de células nos *buffers* para estas variações. Já a implementação da categoria GFR com um mecanismo de controle ABR apresentou um melhor desempenho para as variações de curto prazo em virtude do controle de tráfego realizado pelo mecanismo ABR, o qual resulta na utilização mais eficiente da banda passante do enlace ADSL.

Para o controle ABR, como consequência do atraso na detecção das variações de curto prazo, a taxa de emissão dos TEs fontes, sobretudo utilizando-se a técnica ABR-ER que emprega o algoritmo ERICA+, verificou-se que este procura acompanhar as variações na banda passante do enlace ADSL, o que resulta em um adequado nível de ocupação dos *buffers*, evitando desta forma o descarte de células, que geralmente causa a retransmissão dos pacotes TCP. Logo, ao evitar tal descarte contribui-se para o alcance de um melhor desempenho em termos da vazão do TCP.

No que diz respeito ao atraso de enfileiramento, o gerenciamento de *buffers* realizado pelo algoritmo ERICA+, apresentou o melhor desempenho na solução deste problema. Na

técnica *ABR-Binary*, a implementação Low-T representou um aprimoramento no tratamento do atraso de enfileiramento, embora com o prejuízo da vazão do TCP ocasionado pela redução da taxa de emissão de células.

Considerando-se o aumento no número de VCs ativos, percebe-se que a categoria de serviço ABR apresentou um melhor desempenho em termos de vazão alcançada pelo TCP. Já a implementação da categoria GFR utilizando-se um mecanismo de controle ABR, apresentou um desempenho bem acima do observado para a categoria GFR, que por sua vez apresentou um desempenho semelhante ao alcançado quando não se utilizou qualquer tipo de controle. Com relação à justiça (*fairness*) no compartilhamento da banda passante no enlace, nota-se que ao contrário dos resultados obtidos para a vazão, neste caso a categoria GFR apresentou o melhor desempenho, sendo acompanhada de perto pela implementação da categoria GFR através de um mecanismo de controle ABR devido à utilização em ambas as implementações de mecanismos que promovem o descarte seletivo de pacotes, resultando na justa distribuição dos recursos entre os VCs.

Com relação ao fluxo *downstream* o melhor desempenho em termos de vazão alcançada pelo TCP foi observado para as variações de longo prazo. Uma exceção a este bom desempenho utilizando-se o controle ABR foi a técnica *ABR-Binary*, uma vez que esta técnica apresentou desempenho semelhante a não utilização de qualquer tipo de controle, devido sobretudo a sua alta sensibilidade ao atraso no tempo de resposta do controle. Como resultado da adoção de uma banda passante mais larga no enlace ADSL, para este fluxo de dados a ACR apresentou uma maior frequência de variações.

Como no fluxo *upstream*, utilizando-se os serviços GFR, alcançou-se o melhor desempenho em termos de vazão do TCP para as variações de longo prazo, novamente como resultado do menor índice de descarte de células para estas variações. Contudo, seu

desempenho ainda é relativamente baixo em função da ausência de um controle de tráfego que permita a melhor utilização da banda passante.

Ainda com relação ao fluxo de dados *downstream*, com o emprego do algoritmo ERICA+, independente do intervalo de tempo em que ocorreram as variações na banda passante, para *buffers* de maior capacidade, a vazão do TCP apresentou um alto desempenho.

Por fim, considerando-se o emprego do controle ABR, tanto para o fluxo de dados *upstream* como para o *downstream*, observou-se através das variações da CWND que as constantes retransmissões provocadas pela utilização do protocolo TCP Reno foi um dos causadores da degradação da vazão do TCP.

Vale ressaltar que, a implementação dos serviços GFR através de um mecanismo de controle ABR mostrou-se como uma possível solução para o baixo desempenho alcançado utilizando-se a categoria GFR, uma vez que tal implementação permitiu a obtenção de resultados próximos aos observados para a categoria ABR, porém com maior justiça (*fairness*) entre os VCs.

4.6. CONCLUSÕES

Com o objetivo de elaborar um estudo comparativo de desempenho das categorias de serviço ABR e GFR na minimização da variação de banda passante disponível para aplicações TCP/IP sobre uma rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL, elaborou-se um modelo de simulação para o sistema real. Tal modelo incorporou as aplicações TCP/IP, as variações de banda passante disponível no enlace ADSL, bem como o controle de tráfego ATM. Adotando-se uma estratégia de execução do referido modelo baseada nos fluxos *upstream* e *downstream*, foram obtidos resultados por meio de simulações das implementações das técnicas ABR-ER (algoritmos ERICA+ e EPRCA), ABR-Binary, GFR (Per-VC-WRR) e utilizando um mecanismo de controle ABR para a implementação dos serviços GFR.

De posse dos resultados das simulações, concluiu-se que, dentre as técnicas de controle de tráfego ATM estudadas, o controle realizado pela categoria de serviço ABR utilizando o algoritmo ERICA+ apresentou o melhor desempenho em termos da vazão alcançada pelo TCP, considerando-se as variações na banda passante disponível no enlace ADSL. Logo, conclui-se que a adoção deste controle é a mais indicada para a garantia, às aplicações TCP/IP, de uma determinada QoS utilizando-se uma rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL. Além disso, deve-se destacar a implementação da categoria GFR utilizando um mecanismo de controle ABR, a qual mostrou-se capaz de garantir um elevado desempenho em termos da vazão alcançada pelo TCP e da justiça (*fairness*) entre os VCs.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

O cenário atual de desenvolvimento das telecomunicações apresenta uma crescente necessidade de banda passante disponível à transmissão das informações, associada a um determinado nível de garantia a QoS, devido sobretudo ao surgimento de novas classes de aplicações, tais como as aplicações em banda larga (distribuição de vídeo, aplicações em tempo real, educação à distância, etc), as quais são extremamente exigentes em termos de banda passante.

Neste contexto, predominantemente dominado pela diversidade de tráfegos que são gerados pelas aplicações, viabilizou-se o desenvolvimento da tecnologia ATM sobre ADSL, a qual alia o suporte à qualidade de serviço, a capacidade de comutação e o transporte de múltiplos tipos de tráfego típicos do ATM, à banda passante disponibilizada pela rede de acesso ADSL.

Um problema inerente à utilização de uma rede de acesso ADSL é a variação de banda passante disponível no enlace desta rede. Tal variação é ocasionada sobretudo pelas alterações das condições operacionais e propriedades físicas do enlace, tais como, variações de temperatura e interferências eletromagnéticas (*crosstalk*, ruído impulsivo, sinalização telefônica, etc). Neste caso, poderão ocorrer perdas de informações, ocasionadas pelo elevado nível de ocupação dos *buffers* dos *switches* ATM associados aos ATUs.

Conhecidos os efeitos da variação da banda passante disponível no enlace ADSL para as aplicações TCP/IP sobre uma rede de acesso baseada em ATM sobre ADSL, neste trabalho propôs-se a utilização das categorias de serviço ABR e GFR na minimização de tais efeitos, bem como a implementação da categoria GFR utilizando-se um mecanismo de controle ABR, com o propósito de avaliar a eficiência destas categorias no cumprimento da proposta mencionada.

A categoria de serviço ABR é capaz de controlar a taxa de emissão de células de cada VC baseando-se em informações a respeito das condições da rede. Tal controle utiliza dois tipos de *switches* ATM, o *binary-mode* e o *ER-mode*. A técnica utilizada pelo primeiro *switch* é denominada *ABR-Binary* e a técnica utilizada pelo segundo *switch* é denominada *ABR-ER*.

Fundamentalmente, o controle realizado pela técnica *ABR-Binary* é baseado em informações a respeito do estado de congestionamento da rede contidas no bit CI das células RM. Caso a rede apresente um estado de congestionamento, implementa-se um algoritmo que promove gradativamente a redução da ACR.

Já o controle realizado pela técnica *ABR-ER* utiliza-se de algoritmos que determinam explicitamente o limite da ACR através da ER. Neste trabalho, considerou-se a utilização dos algoritmos ERICA+ e EPRCA, os quais permitem a redução de um dos principais fatores responsáveis pelo descarte de células, o atraso de enfileiramento.

O algoritmo ERICA+ baseia seu controle na determinação do comprimento das filas de células nos *buffers* dos *switches* ATM, em função do intervalo de permanência destas células nos referidos *buffers*. De forma mais específica, o nível de ocupação dos *buffers* será utilizado como referência para o ajuste da ACR, mantendo uma adequada taxa de utilização do enlace, independentemente das variações na banda passante.

No algoritmo EPRCA, o ajuste da ACR é realizado em função do valor de uma variável denominada MACR, que corresponde a uma média exponencial ponderada, calculada

a partir da taxa de transmissão de cada um dos VCs ativos em uma dada conexão ABR. Como no algoritmo ERICA+, o ajuste da ACR permitirá uma adequada taxa de utilização do enlace.

No que diz respeito à categoria de serviço GFR, tal categoria é destinada a usuários que não podem especificar todos os parâmetros necessários à solicitação de serviços da categoria VBR, ou ainda, a usuários que não sejam capazes de determinar as condições da rede, inviabilizando a utilização dos serviços ABR. Esta categoria é capaz de garantir aos VCs uma taxa mínima de transmissão (MCR) no nível de quadros, possibilitando ainda a utilização da banda passante adicional disponibilizada dinamicamente na rede.

No presente trabalho, a categoria GFR foi implementada utilizando-se a técnica Per-VC-WRR, a qual é uma combinação do mecanismo de gerenciamento de *buffers* FBA e do mecanismo de escalonamento WRR. Implementou-se ainda esta categoria utilizando-se um mecanismo de controle ABR.

Considerando-se os resultados obtidos a partir da solução do modelo de simulação proposto neste estudo, observou-se inicialmente a importância da natureza assimétrica do ADSL para a análise de desempenho realizada, uma vez que comportamentos distintos foram observados para os fluxos *upstream* e *downstream*, utilizando-se o controle ABR. Especificamente, as variações de fatores como a ACR e o nível de ocupação dos *buffers*, para os referidos fluxos contribuíram para obtenção de comportamentos distintos da vazão alcançada pelo TCP, no que diz respeito ao intervalo de duração das variações na banda passante do enlace ADSL (variações de curto e longo prazo).

Para o fluxo *upstream*, o controle ABR apresentou um melhor desempenho em termos de vazão do TCP, para as variações de curto prazo, devido ao atraso na detecção de tais variações. Para este fluxo, merece destaque o desempenho alcançado pela técnica ABR-ER, que utiliza o algoritmo ERICA+. Tal desempenho é devido à taxa de emissão dos TEs fontes

acompanhar as variações na banda do enlace, como resultado do adequado nível de ocupação dos *buffers*.

Já para o fluxo *downstream*, o controle ABR apresentou um melhor desempenho em termos de vazão do TCP ao lidar com as variações de longo prazo, devido à rápida resposta do referido controle às variações na banda passante. Vale ressaltar que, com o emprego da técnica ABR-ER, que utiliza o algoritmo ERICA+, independentemente das variações na banda passante do enlace ADSL, para *buffers* de maior capacidade de armazenagem de células, a vazão do TCP apresentou um alto desempenho. Portanto, também para este fluxo merece destaque a técnica ABR-ER que utiliza o algoritmo ERICA+, mais uma vez graças ao controle do nível de ocupação dos *buffers*.

Com relação ao uso da categoria GFR, os resultados obtidos mostraram que embora a justiça (*fairness*) entre os VCs seja satisfatória, a vazão alcançada pelo TCP apresentou um péssimo desempenho, se comparado ao desempenho obtido através do emprego da categoria ABR. A principal razão para este péssimo desempenho é a ausência de um controle de tráfego que permita uma eficiente utilização da banda passante disponível no enlace, o qual é fundamental para obtenção de uma alta vazão do TCP, conforme o estudo realizado.

A implementação da categoria GFR utilizando-se um mecanismo de controle ABR, mostrou-se como uma solução possível para o baixo desempenho alcançado em termos da vazão do TCP utilizando-se a categoria GFR, apresentando ainda um nível adequado de justiça (*fairness*) entre os VCs.

Portanto, o estudo realizado neste trabalho mostrou que a utilização do controle de tráfego ATM, sobretudo aquele realizado pela categoria de serviço ABR, é capaz de garantir a obtenção de um determinado nível de QoS, mesmo considerando-se as variações na banda passante do enlace ADSL, destacando-se a técnica ABR-ER implementada utilizando-se o algoritmo ERICA+, que apresentou uma alta eficiência no combate a problemas como o

atraso de enfileiramento. Porém, vale ressaltar que a implementação da categoria GFR utilizando um mecanismo de controle ABR mostrou-se também capaz de garantir um bom desempenho em termos da vazão alcançada pelo TCP e da justiça (*fairness*) entre os VCs, se comparada às implementações que não utilizaram o algoritmo ERICA+.

Por fim, visando a continuidade deste trabalho sugere-se um estudo que considere versões mais atuais de protocolos TCP, como o TCP Vegas [51], em associação com o controle de tráfego ATM na minimização das variações de banda passante do enlace ADSL, considerando-se ainda condições de tráfego bidirecionais acrescidas de um cenário de rede que explore outras características do enlace ADSL, tais como, seu comportamento em diferentes tipos e níveis de ruído.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DSL FORUM, TR-002: ATM over ADSL Recommendations, March, 1997,
(available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).
- [2] COHEN, R., Service Provising in an ATM over ADSL Access Network, IEEE
Communications Magazine, p. 82 – 87, October, 1999.
- [3] ATM FORUM TECHNICAL COMMITTEE, Traffic Management Specification
Version 4.1, af-tm-0121.000, (available at
<ftp://ftp.atmforum.com/pub/approved-specs/af-tm-0121.000.pdf>).
- [4] ASATANI, K., Access Network Architectural Issues for Future Telecommunication
Networks, IEEE Communications Magazine, p. 110 – 114, August, 1998.
- [5] ANSI T1.413 - Issue 2 - 1998, Network and Customer Installation Interfaces -
Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) Metallic Interface.
- [6] ANSI T1E1.4 – Contribution – 1999, Proposed Normative Text for Spectral
Management Standard – Cable Crosstalk Parameters and Models.
- [7] DSL FORUM, Frequently Asked Questions, (available at
<http://www.adsl.com/faq.html>).
- [8] DSL FORUM, Technical Frequently Asked Questions,
(available at http://www.adsl.com/tech_faqs.html).
- [9] DSL FORUM, TR-001: ADSL Forum System Reference Model, May, 1996,

(available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).

- [10] KAWAHARA, R., SAITO, H., Performance of TCP/IP over ATM over an ADSL, IEICE Transaction Communications, p. 140 - 154, February, 2000.
- [11] KAWAHARA, R. et al., Method of Implementing GFR Service in Large-Scale Networks Using ABR Control Mechanism and It's Performance Analysis, IEICE Transaction Communications, p. 2081 - 2093, December, 1999.
- [12] VANDALORE, B. et al., M., QoS and Multipoint Support for Multimedia Applications over the ATM ABR Service, IEEE Communications Magazine, p. 53 - 57, January, 1999.
- [13] HSIAW, H. et al., ATM FORUM - Contribution / 94-0438R2, Closed-Loop Rate-Based Traffic Management, September, 1994.
- [14] TZENG, H., SIU, K., NEWMAN, P., ATM FORUM - Contribution / 94-0603, Simulation of proportional Rate Control, July, 1994.
- [15] ROBERTS, L., ATM FORUM - Contribution / 94-0735R1, Enhanced Proportional Rate-Control Algorithm, August, 1994.
- [16] JAIN, R. et al., ATM FORUM - Contribution / 96-1172, ERICA Switch Algorithm: A Complete Description, August, 1996.
- [17] GOLMIE, N. et al, The NIST ATM/HFC Network Simulator, Version 4.1, December, 1998.
- [18] CEREDA, R. L. D. et al., ATM O Futuro das Redes, Ed. Makron Books, 1997.
- [19] HAWLEY, G. T., Systems Considerations for the Use of xDSL Technology for Data Access, IEEE Communications Magazine, p. 56 - 60, March, 1997.
- [20] MAXWELL, K., Asymmetric Digital Subscriber Line: Interim Technology for the Next Forty Years, IEEE Communications Magazine, p. 100 - 106, October, 1996.
- [21] VEENEMAN, D., OLSHANSKY, R., ADSL for Video Data Services, IEEE

- International Conference on Gateway to Globalization, p. 837 - 841, vol. 2, 1995.
- [22] HUMPHREY, M., FREEMAN, J., How xDSL Supports Broadband Services to the Home, IEEE Network, p. 14 – 23, January/February, 1997.
- [23] CHEN, W. Y., The Development and Standardization of Asymmetrical Digital Subscriber Lines, IEEE Communications Magazine, p. 68 – 72, May, 1999.
- [24] DSL FORUM, TR-003: Framing and Encapsulation Standards for ADSL: Packet Mode, September, 1997, (available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).
- [25] HORSFIELD, C., ATM over ADSL, Teletraffic 97, (available at <http://crg.ee.uct.ac.za/~chorsfi/#G>).
- [26] PHANSE, K., Simulation Study of an ADSL Network Architecture: TCP/IP Performance Characterization and Improvements using ACK Regulation and Scheduling Mechanisms, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Alexandria, Virginia, October, 2000, 112 p.
- [27] DSL FORUM, TR-017 and annex: ATM over ADSL Recommendations, March, 1999, (available at http://adsl.com/dsl_forum.html).
- [28] DSL FORUM, TR-021: ADSL Forum Recommendation for ATM Layer of ADSLs, May, 1999, (available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).
- [29] DSL FORUM, TR-023: Overview of ADSL Testing, August, 1999, (available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).
- [30] DSL FORUM, TR-029: ADSL Dynamic Interoperability Testing, February, 2000, (available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).
- [31] DSL FORUM, TR-012: Broadband Service Architecture for Access to Legacy Data Networks over ADSL (PPP over ATM), September, 1998, (available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).

- [32] DSL FORUM, TR-019: ADSL Forum Recommendation for Physical Layer of ADSL with a Splitter, May, 1999, (available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).
- [33] DSL FORUM, TR-025: Core Network Architecture Recommendations for Access to Legacy Data Networks over ADSL, November, 1999, (available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).
- [34] ATM FORUM TECHNICAL COMMITTEE, Residential Broadband Architectural Framework, af-rbb-0099.000, (available at <ftp://ftp.atmforum.com/pub/approved-specs/af-rbb-0099.000.pdf>).
- [35] LU, G. et al., The Performance of TCP over ATM on Lossy ADSL Networks, LCN 2000, Tampa, USA, November, 2000.
- [36] GROSS, G. et al., PPP over AAL5, IETF RFC 2364, July, 1998.
- [37] PHANSE, K. S. et al., Characterization of Performance of TCP/IP over PPP and ATM over Asymmetric Links, ICCCN 2000, 7 p. (available at <http://www.ee.vt.edu/~ldasilva/pubs.html>).
- [38] STALLINGS, W., High-Speed Networks: TCP/IP and ATM Design Principles, Ed. Prentice-Hall, 1998.
- [39] VEDAGE, B., The Behavior of TCP Transmission over an ADSL/ATM Network, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, June, 1999, 49 p.
- [40] POSTEL, J., Transmission Control Protocol, IETF RFC 793, September, 1981.
- [41] COMER, D., Interligação em Rede com TCP/IP, Ed. Campus, Volume 1, 2ª Edição, 1998.
- [42] STEVENS, W., TCP Slow Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit and Fast Recovery Algorithms, RFC 2001, January, 1997.
- [43] GOYAL, R. et al., ATM FORUM - Contribution / 98-0807, Effect of RM cell Interval

on ABR Feedback: A Simulation Study Using OPNET, July, 1998.

- [44] TSAI, W., GE, Y., HUANG, G., Stability Analysis of Intelligent Marking EPRCA for ABR Congestion Control in ATM, Infocom 97, (available at <http://www.computer.org/proceedings/infocom/7780/77800380abs.htm>).
- [45] BONAVENTURE, O., A Simulation Study of TCP with the Proposed GFR Service Category, DAGSTUHL Seminar, Germany, June, 1997.
- [46] PAPPU, S., BASAK, D., ATM FORUM - Contribution / 97-0528, GFR Implementation Alternatives with Fair Buffer Allocation Schemes, July, 1997.
- [47] GOYAL, R. et al., UBR+: Improving Performance of TCP over ATM-UBR Service, ICC 97, (available at <http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/papers/icc97.ps>).
- [48] PAPPU, S., BASAK, D., ATM FORUM - Contribution / 97-0310, TCP over GFR Implementation with Different Service Disciplines: A Simulation Study, May, 1997.
- [49] GOYAL, R. et al., ATM FORUM - Contribution / 97-0607, Simulation Experiments with Guaranteed Frame Rate for TCP/IP Traffic, July, 1997.
- [50] KALYANARAMAN, S. et al., Performance of TCP/IP over ABR Service on ATM Networks, Globecom 96, (available at <http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/papers/globecom.htm>).
- [51] MO, J. et al., Analysis and comparison of TCP Reno and TCP Vegas, INFOCOMM 99, p. 1556 - 1563, March, 1999.
- [52] DSL FORUM, TR-007: Interfaces and System Configurations for ADSL: Customer Premises, March, 1998, (available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).
- [53] DSL FORUM, TR-011: An End-to-End Packet Mode Architecture with Tunneling and Service Selection, June, 1998, (available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).

- [54] DSL FORUM, TR-020: ADSL Forum Recommendation for Physical Layer of ADSLs without a Splitter, May, 1999, (available at http://www.adsl.com/dsl_forum.html).
- [55] ATM FORUM TECHNICAL COMMITTEE, Physical Interface Specification for 25.6 Mb/s over Twisted Pair Cable, af-phy-0040.000, (available at <ftp://ftp.atmforum.com/pub/approved-specs/af-phy-0040.000.pdf>).
- [56] GIROUX, N., RAMANAN, S., ATM FORUM - Contribution / 98-0825, Handling Physical Rate Changes in ADSL and Other Technologies, December, 1998.
- [57] AZCORRA, A., LARRABEITI, D., IP/ATM Integrated Services over Broadband Access Copper Technologies, IEEE Communications Magazine, p. 90 – 97, May, 1999.
- [58] PAPIR, Z., Competing for Throughput in the Local Loop, IEEE Communications Magazine, p. 61 – 66, May, 1999.
- [59] PUANGPRONPITAG, S., KARA, M., DJEMAME, K., A Performance Evaluation of Buffer Management and Scheduling for ATM-GFR Using TCP, ATM-Multimedia Group, 8th IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM and IP Networks, Ilkley, UK, July, 2000.
- [60] FENG, B., GHOSAL, D., KANNAPPAN, N., Impact of ATM ABR Control on the Performance of TCP-Tahoe and TCP-Reno, Globecom 97, (available at <http://networks.cs.ucdavis.edu/~ghosal/Globecom.html>).
- [61] HORSFIELD, C., ADSL Line Simulation and ATM as the Access Protocol for ADSL Access Networks, SATNAC 98, (available at <http://crg.ee.uct.ac.za/~chorsfi/#G>).
- [62] COPE, G., GROTZ, J., Broadband Technology - Design Issues for Internet Based Services, Fujitsu, (available at http://www.ftel.co.uk/prod_info/bbtech.html).
- [63] COMER, D., Computer Networks and Internets, Prentice Hall, 1997.
- [64] MOURA, J. A. B. et al., Redes Locais de Computadores: Protocolos de Alto Nível e

Avaliação de Desempenho, Ed. Mc Graw-Hill, 1986.

- [65] ROSENBERG, S. et al., Functionality at the Edge: Designing Scalable Multiservice ATM Networks, IEEE Communications Magazine, p. 88 – 99, May, 1998.
- [66] BHAGAVATH, V. K., Emerging High-Speed xDSL Access Services: Architectures, Issues, Insights, and Implications, IEEE Communications Magazine, p. 106 – 114, November, 1999.
- [67] SOARES, L. F. G., LEMOS, G., COLCHER, S., Redes de Computadores: das LANs, MANs e WANs às Redes ATM, 6ª Edição, Ed. Campus, 1995.
- [68] BALAKRISHNAN, H., PADMANABHAN, V. N., How Network Asymmetry Affects TCP, IEEE Communications Magazine, p. 60 - 67, April, 2001.
- [69] HONG, D. P. et al., Evaluating the Impact of Emerging Streaming Media Applications on TCP/IP Performance, IEEE Communications Magazine, p. 76 - 82, April, 2001.

Trabalhos Publicados pelo Autor:

- [70] FILHO, C. F. A., GUARDIEIRO, P. R., Um Estudo a Respeito da Implementação do ATM sobre ADSL, I Seminário Nacional de Controle e Automação Industrial, Elétrica e de Telecomunicações - I SNAC, Salvador – Bahia, 10 a 12 de Novembro de 1999.
- [71] FILHO, C. F. A., GUARDIEIRO, P. R., Análise de Desempenho dos Protocolos TCP/IP sobre uma Rede Física Baseada em ATM sobre ADSL, Anais do III Seminário de Estudos em Engenharia Elétrica, III SEEE, Universidade Federal de Uberlândia, 23 a 26 de Outubro de 2000.
- [72] FILHO, C. F. A., GUARDIEIRO, P. R., Performance Evaluation of TCP/IP over ATM over ADSL, CONFTELE 2001, Figueira da Foz, Portugal, p. 130 - 134, April,

2001, ISBN 972 - 98115 - 2 - 0.

- [73] FILHO, C. F. A., GUARDIEIRO, P. R., Simulation Study of TCP/IP over ATM over ADSL, accepted for publication in 5th WSES/IEEE Multiconference, Rethymnon, Grécia, July 8 - 15, 2001.
- [74] FILHO, C. F. A., GUARDIEIRO, P. R., Um Estudo de Desempenho de Aplicações TCP/IP sobre uma Rede de Acesso Baseada em ATM sobre ADSL, Anais do 19º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Fortaleza, 03 a 06 de Setembro de 2001.
- [75] FILHO, C. F. A., GUARDIEIRO, P. R., Estudo Comparativo de Desempenho das Categorias de Serviço ABR e GFR com Aplicações TCP/IP sobre uma Rede de Acesso Baseada em ATM sobre ADSL, sob julgamento para publicação na Revista Ciência e Engenharia, Universidade Federal de Uberlândia.

CAPÍTULO 7

ANEXOS

7.1. ANEXO I - PSEUDOCÓDIGO DE OPERAÇÃO DO CONTROLE REALIZADO PELO ALGORITMO EPRCA

A seguir será apresentado a operação do *switch* ATM utilizando-se o algoritmo EPRCA para controle da *explicit rate* (ER).

Inicialization

ACR=IMR

if receive ABR cell

if queue-length < output-queue-size

add cell to output queue

if queue-length > DQT

very-congested = TRUE

if queue-length > HT

congested = TRUE

else drop cell

if schedule ABR cell to link

if queue-length < LT

congested = FALSE

if queue-length < DQT

very-congested = FALSE

if cell is RM (DIR=*forward*, CCR, ER, CI)

if (*congestion and* MACR > CCR) *or*

(*no congestion and* MACR * VCS < CCR)

MACR = MACR + (CCR - MACR) * AV

if cell is RM (DIR=*backward*, CCR, ER, CI)

if congested

if very-congested

ER = *min*(ER, MACR * MRF)

else if CCR > MACR * DPF

ER = *min*(ER, MACR * ERF)

Parâmetros:

IMR (*Initial MACR Rate*)

VCS (*VC Separator*)

AV (*Average Factor*)

DQT (*Very Congest Queue Threshold*)

MRF (*Major Reduction Factor*)

DPF (*Down Pressure Factor*)

ERF (*Explicit Reduction Factor*)

HT (*High Threshold*)

LT (*Low Threshold*)

FU-00013100-1