CARMEN ORENCIA CARRASCO ARBIETO

ALOCÇÃO DINÂMICA DE LARGURA DE BANDA EM REDES EPON

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica: Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Amílcar Careli César

São Carlos

2007

A meus pais, Carlos e Rosario, meus irmãos Carlos, Adolfo e Rosario e ao Jorge pelo incentivo, amor e carinho.

Agradecimentos

A Deus por acompanhar-me sempre e permitir que eu conseguisse alcançar esta meta.

Aos meus pais Carlos e Rosario pelos ensinamentos e valores que me inculcaram, pelo amor e pela confiança que sempre me entregaram e porque são exemplos em minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Amílcar Caréli César pela oportunidade do trabalho conjunto, pelos ensinamentos, paciência e compreensão durante todas as etapas deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Telecomunicações, em especial ao Prof. Dr. Ben-Hur Viana Borges pelo apoio constante, ao Prof. Dr. Murilo Araujo Romero e Profa. Dr. Mônica de Lacerda Rocha pelas sugestões para a finalização deste trabalho.

À doutora Miriam Regina Xavier de Barros do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações-CPQD pelos comentários e sugestões para a culminação deste trabalho.

Aos meus irmãos, pelo amor, amizade e apoio incondicional que me brindam em todas as etapas da minha vida.

Ao Jorge, por todo amor, apoio, cuidado e compreensão que me brinda todos os dias.

Ao Rivail e Helvecio pela grande amizade, companheirismo e pela colaboração direta neste trabalho.

Às minhas amigas Cristhiane, Marina, Liliane e Margarita, pela valiosa amizade e por fazer mais agradável minha estada no Brasil.

Aos meus amigos do Departamento, Pizolato, Regiane, Fernanda, Valtemir, Emiliano, Pedro, Iang, Anderson e Danilo pela amizade e convívio.

Aos funcionários do Departamento de Elétrica Dennise, Marisa, José e Jussara.

Resumo

As redes de telecomunicações se dividem em redes de longa distância, redes metropolitanas e redes de acesso. As redes de longa distância e metropolitana usufruem a alta capacidade de largura de banda da fibra óptica, enquanto nas redes de acesso há um gargalo de largura de banda por causa do uso de pares de fios e cabo coaxial. Para solucionar este problema e oferecer aos usuários acesso banda larga de baixo custo foram propostas as redes ópticas passivas (*passive optical network* – PON). A PON é formada por dois elementos básicos, a unidade de rede óptica (*optical network unit* - ONU), localizada perto dos assinantes, e o terminal de linha óptica (*optical line terminal* - OLT), localizado próximo ao provedor de serviços.

Dentre os padrões disponíveis para redes PON, o *Ethernet* (EPON), padronizado pelo grupo IEEE 802.3ah, é opção atraente porque ele é bastante difundido nas redes locais. O protocolo de controle multiponto (*multipoint control protocol* - MPCP), já especificado, é responsável pelo controle de acesso ao meio, fornecendo infra-estrutura de sinalização para transmissão entre OLT e ONUs. Entretanto, o algoritmo de alocação de largura de banda, que realiza o controle de acesso ao meio com base no MPCP, foi considerado fora do escopo de trabalho do grupo de trabalho, permitindo que seja desenvolvido pelos fornecedores de equipamentos.

Neste trabalho, arquiteturas de rede EPON e o protocolo MPCP são descritos e algoritmos de alocação de largura de banda são avaliados mediante simulação computacional. São abordados os algoritmos de alocação de largura de banda que integram multiplexação estatística e técnicas para o suporte a classes de serviços diferenciados, com base no esquema de multiplexação por divisão no tempo (*time division multiplexing* - TDM). Algoritmos que integram a multiplexação por divisão em comprimento de onda (*wavelength division multiplexing* - WDM) à arquitetura EPON TDM são também investigados. Os algoritmos WDM-TDM permitem a atualização progressiva da EPON que emprega o esquema TDM para WDM.

Palavras-chave: fibra óptica, EPON, *Ethernet*, alocação dinâmica de largura de banda, multiplexação estatística, classes de serviço, redes de acesso.

Abstract

Telecommunication networks are divided into core, metropolitan and access networks. The core and metropolitan networks use high capacity bandwidth optical fibers, while the access networks have bandwidth bottlenecks because of the use of twisted-pair wires and coaxial cable. To solve this problem and to offers the users broadband access at low cost the use of passive optical networks (PON) is proposed. A PON is formed by two basic elements, the optical network unit (ONU), positioned close to the customers and the optical line terminal (OLT), located close to the service provider.

Within the available standards for PON networks, the Ethernet (EPON), standardised by the IEEE group 802.3ah, is an attractive option because it is already widely used in local networks. The multipoint control protocol (MPCP), already specified, is responsible for the media access control, providing signaling infrastructure for transmission between OLT and ONUs. However, the bandwidth allocation algorithm, that controls access based on MPCP, was considered outside the scope of the work group, permitting that this be developed by equipment providers.

In this work, EPON architectures and the MPCP protocol are described and bandwidth allocation algorithms are evaluated with computational simulation. Bandwidth allocation algorithms which integrate statistical multiplexing and techniques to support for differentiated classes of service, based on time division multiplexing (TDM) scheme are investigated. Algorithms that integrate wavelength division multiplexing (WDM) to the EPON TDM architecture are also investigated. The WDM-TDM algorithms permit the progressive upgrade of EPON based TDM to WDM schemes.

Keywords: optical fibers, EPON, Ethernet, dynamic bandwidth allocation, statistical multiplexing, classes of service, access networks.

Resumen

Las redes de telecomunicaciones se dividen en redes de área extensa, redes metropolitanas e redes de acceso. Las redes de área extensa e metropolitana aprovechan la capacidad alta de la fibra óptica, mientras que las redes de acceso presentan estrangulamiento de ancho de banda debido a la utilización de pares trenzados y cables coaxiales. Para solucionar este problema y ofrecer a los usuarios acceso de alta velocidad con bajos costos fueron propuestos redes ópticas pasivas (*passive optical network* – PON). La PON está formada por dos elementos básicos, la unidad de red óptica (*optical network unit* - ONU), localizada cerca a los usuarios, y el Terminal de línea óptica (*optical line terminal* - OLT), localizado cerca al proveedor de servicio.

Entre los padrones disponibles para las redes PON, el padrón *Ethernet* (EPON), padronizado por el grupo IEEE 802.3ah, es una opción interesante porque este es ampliamente difundido en las redes de área local. El protocolo de control multipunto (*multipoint control protocol* - MPCP), ya especificado, es el responsable de realizar el control de acceso al medio, disponiendo infraestructura de señalización para la transmisión entre el OLT y las ONUs. Sin embargo, el algoritmo de asignación de ancho de banda, que realiza el control de acceso al medio basado en el MPCP, fue considerado fuera del proyecto de ese grupo de trabajo, permitiendo que sea desenvuelto por los fabricantes.

En este trabajo son descritos la arquitectura de la red EPON y el protocolo MPCP y también son evaluados los algoritmos de asignación de ancho de banda mediante simulación computacional. Son abordados los algoritmos de asignación de ancho de banda que integran multiplexación estadística y técnicas para el soporte a clases de servicios, basado en el esquema de multiplexación por división del tiempo (*time division multiplexing* - TDM). También, son investigados los algoritmos que integran la multiplexación por división de longitud de onda (*wavelength division multiplexing* - WDM) a la arquitectura EPON TDM. Los algoritmos WDM-TDM permiten mejorar progresivamente la EPON que utiliza el esquema TDM para WDM.

Palabras clave: fibra óptica, EPON, *Ethernet*, asignación dinámica de ancho de banda, multiplexación estadística, clases de servicio, redes de acceso.

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Demanda de largura de banda de vários serviços [8].....	3
Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens das tecnologias de acesso ao meio em PON.....	20
Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens dos protocolos utilizados na camada de enlace de dados em PON.	21
Tabela 2.3 - Padrões para APON/BPON, GPON e EPON e algumas características [8].	24
Tabela 3.1 - Relação entre o modelo OSI e as camadas LAN do IEEE.....	28
Tabela 4.1 - Mapeamento das classes de tráfego dentro de filas de prioridade (P802.1).....	55
Tabela 4.2 - Resumo das principais características de vários mecanismos em esquemas DBA para QoS.	62
Tabela 5.1 - Parâmetros utilizados nas simulações.	69
Tabela 6.1 - Parâmetros de simulação	96

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Arquitetura FTTx.	5
Figura 1.2 - Rede P2P interligando uma central com N usuários [7].....	6
Figura 1.3 - Rede ativa utilizando um multiplexador ativo para conectar N usuários.....	6
Figura 1.4 - Rede óptica passiva conectando N usuários [7].	7
Figura 2.1 - Implementação das redes de acesso FTTx, com a tecnologia PON.....	13
Figura 2.2 - Topologia das redes PON.....	16
Figura 3.1 - Formato do quadro <i>Ethernet</i>	29
Figura 3.2 - Tráfego na direção <i>downstream</i> na EPON.....	31
Figura 3.3 - Tráfego na direção <i>upstream</i> na EPON.....	31
Figura 3.4 - Uma EPON utilizando acoplador em estrela <i>loopback</i>	33
Figura 3.5 - Bloco de gerenciamento no OLT.	35
Figura 3.6 - Mensagens <i>gate</i>	37
Figura 3.7 - Mensagem <i>report</i>	37
Figura 3.8 - Fluxo das mensagens <i>gate</i> e <i>report</i> [37].	39
Figura 3.9 - Cálculo do RTT no OLT para uma determinada ONU.....	40
Figura 4.1 - Políticas de interrogação: a) <i>poll-and-stop</i> , b) intercalado, c) intercalada com parada [37].	48
Figura 4.2 - Programação inter-ONU e intra-ONU [22].....	53
Figura 4.3 - Enfileiramento prioritário e programação intra-ONU.....	56
Figura 5.1 - Quadro de controle inserido no quadro <i>Ethernet</i> [41].....	66
Figura 5.2 - Topologia da rede simulada com taxa de transferência R_u na fibra tronco e R_D até os usuários.	68
Figura 5.3 - Diagrama de classes.	73

Figura 5.4 - Atraso médio do quadro versus carga oferecida pela ONU.....	76
Figura 5.5 - Tamanho médio da fila versus carga oferecida pela ONU.	77
Figura 5.6 - Razão de quadros perdidos em função da carga oferecida na ONU.....	78
Figura 5.7 - Tempo médio do ciclo de interrogação em função da carga oferecida na ONU..	79
Figura 5.8 - Atraso médio do quadro para cada uma das prioridades versus a carga na ONU.	82
Figura 5.9 - Atraso médio do quadro para o tráfego de prioridade alta (EF), média (AF) e baixa (BE), utilizando o esquema <i>buffer de segunda fase</i>	83
Figura 5.10 - Atraso médio do quadro para o tráfego de prioridade alta (EF), média (AF) e baixa (BE), utilizando o esquema <i>crédito CBR</i>	84
Figura 6.1 – Proposta de extensão WDM aos PDUs do protocolo MPCP: (a) REGISTER_REQ; (b) GATE; (c) RX_CONFIG.....	89
Figura 6.2 - Diagrama de fluxo do algoritmo que determina o comprimento de onda ótimo para alocar numa determinada ONU (integrado ao IPACT).	91
Figura 6.3 - Interrogação intercalada operando com dois comprimentos de onda e as ONUs dando suporte a classes de serviço.	93
Figura 6.4 - Diagrama de fluxo da programação das transmissões efetuada na ONU.	94
Figura 6.5 - Diagrama de fluxo do processo de enfileiramento realizado na ONU.	95
Figura 6.6 - Atraso do quadro versus número de comprimento de onda na EPON (N=16). ...	97
Figura 6.7 - Atraso do quadro versus número de ONUs não-WDM para a EPON operando com 4 comprimentos de onda (N=16).	98
Figura 6.8 - Atraso do quadro versus número de ONUs não-WDM, variando o tamanho do <i>timeslot</i> máximo a ser alocado, para a EPON operando com 4 comprimentos de onda (N=16).	99
Figura 6.9 - Atraso do quadro versus número de comprimento de onda na EPON (N=32). .	100

Figura 6.10 - Atraso médio do quadro para a EPON variando o número de comprimentos de onda de operação e as ONUs WDM apresentam o dobro, triplo e até o quádruplo da carga das ONUs não-WDM.	101
Figura 6.11 - Atraso médio do quadro para os tráfegos de prioridade alta (EF), média (AF) e baixa (BE) utilizando dois comprimentos de onda.	102
Figura 6.12 - Atraso médio do quadro para os tráfegos de prioridade alta (EF), média (AF) e baixa (BE) utilizando três comprimentos de onda.	103

Lista de Abreviaturas e Siglas

ADSL	Asymmetric digital subscriber line
AF	assured forwarding
ATM	asynchronous transfer mode
APON	ATM PON
BE	Best effort
CBR	constant bit rate
CM	cable modem
CSMA/CD	carrier-sense multiple access/collision detection
Cós	classes of service
DBA	dynamic bandwidth allocation
EF	expedited forwarding
EFM	ethernet in the first mile
EPON	ethernet PON
FCS	frame check sequence
FIFO	First in first out
FTTC	fiber to the curb
FTTCab	fiber to the cabinet
FTTH	fiber to the home
FTTB	fiber to the building
GFP	generic framing protocol
GPON	gigabit-capable PON
HFC	hybrid fiber coax
IFG	interframe gap
ITU	International Telecommunication Union
IPACT	interleaved polling with adaptive cycle time
LAN	local area network
LLC	logical link control
LRD	long-range dependence
MAC	media access control
NID	node identification
OAM&P	Operation, administration, maintenance and provisioning
OCDMA	optical code division multiple access
OLT	optical line terminal

ONU	optical network unit
OSI	open system interconnection
P2MP	point-to-multipoint
P2P	pont-to-point
PDU	protocol data unit
PON	passive optical network
QoS	quality of service
RF	radio frequency
RTT	round-trip time
SCMA	subcarrier division multiple access
SFD	start of frame delimiter
SLA	service level agreements
SRD	short-range dependence
TDMA	time division multiple access
UTP	unshielded twisted pair
VBR	variable bit rate
VDSL	very high speed digital subscriber line
VoIP	voice over IP
VoD	video on demand
WDMA	wavelength division multiple access
xDSL	digital subscriber line

Lista de Símbolos

$Q_i(n)$	tamanho do <i>timeslot</i> atribuído à ONU i no ciclo n
$\lambda_i(n)$	tamanho acumulado dos quadros que chegaram à ONU i durante o ciclo $(n, n + 1)$
$q_i(n)$	comprimento da fila na ONU i no ciclo n
Γ	fator de ganho
$G_j^{[i]}$	instante em que a j -ésima mensagem <i>gate</i> será transmitida à i -ésima ONU
$r^{[i]}, A^{[i]}$	RTT da i -ésima ONU
$W_j^{[i]}, D_j^{[i]}$	comprimento do j -ésimo <i>timeslot</i> para a i -ésima ONU
R_u, S	taxa de transmissão da fibra que conecta as ONUs com o OLT
B	tempo de guarda
R_D	taxa de transmissão do canal que conecta as ONUs com os usuários
N	número total de ONUs
Q	tamanho do buffer nas ONUs
L	distância máxima entre o OLT e as ONUs
W_{MAX}	máximo tamanho do <i>timeslot</i>
T_{MAX}	tempo máximo do ciclo de interrogação
$P(A(t) = n)$	probabilidade da distribuição de Poisson
T	intervalo de tempo
λ	valor médio de ocorrências por unidade de tempo
N	número ocorrências num determinado intervalo de tempo
$f(x)$	probabilidade de ocorrência numa distribuição exponencial
X	variável aleatória com distribuição exponencial
U	número aleatório com distribuição uniforme
K	valor mínimo de uma rajada
P	valor máximo de uma rajada
Y	número de quadros de uma rajada
A	parâmetro de forma de distribuição bounded Pareto
H	parâmetro de Hurst
$t_{\lambda i}$	instante em que o λi será liberado
t_{atual}	tempo atual

B_{ONU}	tempo de guarda que a ONU precisa para efetuar o processamento
t_s	intervalo necessário para a sintonização do transmissor
t_i^j	instante em que começa a transmissão da ONU j no comprimento de onda i
RTT_v	intervalo de tempo de volta do sinal, da Onu ao OLT
W_j	<i>timeslot</i> atribuído à ONU j
O_{WDM}	número de ONUs WDM
P	número de classes de prioridade

Sumário

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 REDES DE ACESSO DE BANDA LARGA	2
1.1.1 Tecnologia em Fibra Óptica	4
1.2 OBJETIVOS	10
CAPÍTULO 2 REDES ÓPTICAS PASSIVAS.....	11
2.1 COMPONENTES DAS REDES PON	13
2.2 ARQUITETURA DE REDES PON	14
2.2.1 Topologia das Redes PON.....	15
2.2.2 Técnicas de Acesso Múltiplo e Multiplexação.....	16
2.2.2.1 TDMA	17
2.2.2.2 WDMA	17
2.2.2.3 SCMA.....	18
2.2.2.4 OCDMA	18
2.2.2.5 Esquemas Híbridos	19
2.3 TIPOS DE REDES PON	21
2.3.1 APON e BPON	22
2.3.2 EPON.....	22
2.3.2.1 Extensões de EPON Futura	23
2.3.3 GPON	23
2.3.4 Características das abordagens BPON/GPON e EPON	24
CAPÍTULO 3 REDE EPON	27
3.1 ETHERNET.....	27
3.1.1 Subcamada MAC.....	28
3.1.2 Camada Física	29
3.2 ARQUITETURA DE REDES EPON.....	30
3.3 PROTOCOLO PARA O ACESSO MÚLTIPLO.....	32
3.4 IEEE 802.3AH	33
3.4.1 Protocolo MPCP	34
3.4.1.1 Mensagens de Controle	35

3.4.1.2	Operação do MPCP.....	38
CAPÍTULO 4 ALOCAÇÃO DE LARGURA DE BANDA.....		41
4.1	ALGORITMOS DBA	43
4.1.1	Tarefas do DBA	43
4.1.1.1	Limitação da Largura de Banda [20]	43
4.1.1.2	Utilização do Canal.....	46
4.1.1.3	Programação das Transmissões	48
4.2	TIPOS DE ALGORITMOS DBA	49
4.2.1	Métodos de Multiplexação Estatística	49
4.2.2	Suporte a Qualidade de Serviço	51
4.2.2.1	Padrão IEEE 802.1D	53
4.2.2.2	Enfileiramento prioritário	56
4.2.2.3	Programação por Prioridade.....	57
4.2.3	Algoritmos com Garantia de QoS	58
4.2.4	Algoritmos DBA Descentralizados.....	63
CAPÍTULO 5 ALGORITMOS DBA E QUALIDADE DE SERVIÇO		64
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO IPACT.....	64
5.1.1	Mensagens de Controle.....	65
5.1.2	Programação de Mensagem de Controle	66
5.1.3	Partida a Frio (<i>cold start</i>).....	67
5.2	DESCRIÇÃO DO MODELO	68
5.3	TRÁFEGO.....	70
5.3.1	Tráfego Poissoniano.....	70
5.3.2	Tráfego Auto-similar.....	71
5.4	DESCRIÇÃO DO PROGRAMA.....	72
5.5	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	75
5.6	ALGORITMO COM QoS	79
5.6.1	Enfileiramento prioritário	80
5.6.2	Modelagem de tráfego	80
5.6.3	Programação por Prioridade e Resultados	81
CAPÍTULO 6 ALGORITMOS DWBA		85
6.1	EXTENSÃO WDM PARA O MPCP.....	86

6.2 ALGORITMO DWBA IPACT	90
6.3 ALGORITMO DWBA IPACT ESTENDIDO PARA CLASSES DE SERVIÇO	93
6.4 RESULTADOS	95
6.4.1 Esquema DWBA IPACT	96
6.4.2 Esquema DWBA IPACT estendido para Classes de Serviço.....	101
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	104
7.1 CONCLUSÕES	104
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	106
Referências Bibliográficas	107
Publicação Associada	112

CAPÍTULO 1 Introdução

As redes ópticas podem ser classificadas de acordo com a distância de cobertura em redes de longa distância (*core*), redes metropolitanas e redes de acesso [1].

As redes de acesso interconectam a central do provedor de serviço aos usuários¹, constituindo a última etapa do fluxo de informação, comumente referida como última milha. As redes de acesso experimentaram menores mudanças em sua infra-estrutura em comparação às redes de longa distância e metropolitanas, as quais usufruem dos benefícios da tecnologia de multiplexação de comprimento de onda, fornecendo largura de banda de Gbps por comprimento de onda. Por outro lado, as redes locais (*local area network* - LAN) aumentaram sua taxa de transferência de 10 Mbps para 100 Mbps, depois para 1 Gbps e, ultimamente, alcançam 10 Gbps. A capacidade do enlace que interliga as redes metropolitanas e as LANs constitui um gargalo.

Atualmente, as tecnologias de redes de acesso amplamente difundidas são a linha digital de assinante (*digital subscriber line* - xDSL) e a de modem a cabo (*cable modem* - CM) [2]. Entretanto, essas tecnologias estão se tornando incapazes de dar suporte ao crescimento exponencial do tráfego e à demanda de serviços de banda larga como voz sobre IP (*voice over IP* - VoIP), vídeo sob demanda (*video on demand* - VoD), jogos interativos e videoconferências. Outra grande desvantagem dessas tecnologias é a limitação de distância para altas taxas de transmissão, acarretando restrições ao acesso. Conseqüentemente, as redes de acesso apresentam um gargalo na última milha de transmissão [3]. Os provedores de serviço de telecomunicações realizaram uma exploração exaustiva dos recursos existentes na

¹ Usuário refere-se a um usuário individual ou em grupo (os que são parte de uma rede local).

infra-estrutura da última milha, surgindo, então, a necessidade de redes que forneçam maior largura de banda.

A tecnologia de fibra óptica surgiu como uma solução viável para o atendimento do compromisso entre alta taxa de transmissão e comprimento do enlace. Atualmente, a fibra óptica é muito empregada em redes de longa distância e metropolitana, porém ainda não é muito disseminada em redes de acesso em razão dos custos. Procuraram-se tecnologias baseadas em fibra que fossem economicamente viáveis, simples, “escaláveis”² e que suportassem serviços integrados de voz, vídeo e dados. A rede óptica passiva (*passive optical network* – PON) tem se destacado como solução para as redes de acesso, pois possibilitam uma infra-estrutura com melhor custo-benefício.

1.1 Redes de Acesso de Banda Larga

A demanda dos usuários atraiu as companhias especializadas principalmente em comunicações de dados, tendo como horizonte um ambiente global com rede convergente de voz, vídeo e dados. Assim, a *networking community* renomeou este segmento da rede como a *primeira milha*, para realçar sua prioridade e importância [4].

Atualmente, as redes de acesso estão divididas em duas categorias: sem fio e com fio. A maior parte da infra-estrutura de redes de acesso utiliza tecnologia baseada em fio, empregando pares trançados e cabos coaxiais, como x-DSL e modem a cabo respectivamente. A tecnologia ADSL (*asymmetric DSL*) oferece taxa de transmissão de até 6 Mbps na direção *downstream*, alcançando distâncias de até 4 km, enquanto a VDSL (*very high speed DSL*) pode transmitir até 50 Mbps para distâncias de até 500 m [5]. A tecnologia de modem a cabo é tipicamente um sistema híbrido que utiliza cabo coaxial e fibra (*hybrid fiber coax* - HFC). A

² A “escalabilidade” indica a habilidade do sistema para dar suporte à expansão continuada ou estar preparado para permitir as atualizações que melhorem sua capacidade sem perder a qualidade dos serviços oferecidos.

fibra óptica é utilizada para interligar a central com os nós remotos, e o cabo coaxial para interligar os nós remotos com os usuários. Nessas redes, a taxa máxima de transmissão na direção *downstream* é 2,8 Gbps e 150 Mbps na direção *upstream*. Porém, como 500 a 1000 assinantes compartilham a largura de banda dentro de uma célula³, a taxa garantida por assinante é comparável com a taxa oferecida por x-DSL [6]. Para solucionar o problema causado pelo gargalo apresentado nessas infra-estruturas foram propostas novas tecnologias em redes de acesso baseadas em fibra óptica (redes com fio) e sistemas sem fio (WiFi, WiMax) [5], [7]. A Tabela 1.1 mostra os diferentes requisitos de largura de banda de alguns serviços, sendo que o sinal de voz requer uma largura de banda pouco menor que 100 Kbps, o sinal de televisão de alta definição (*high definition television* - HDTV) e o sinal de televisão padrão (*standard definition television* - SDTV) requerem largura de banda de até 20 Mbps e 6 Mbps, respectivamente. Com as novas técnicas de codificação, esses valores podem ser reduzidos a 10 Mbps para HDTV e 1,5 Mbps para SDTV.

Tabela 1.1 - Demanda de largura de banda de vários serviços [8].

Serviço	Largura de banda (Mbps)	
2 x HDTV	2 x 10 Mbps	20
2 x TV vídeo digital padrão	2 x 1,5 Mbps	3
Som de qualidade de CD	200 Kbps	0,2
Telefonia	Menos que 100 Kbps	0,1
Navegação pela web	10 Mbps (Max)	10
Total de largura de banda		33,3

A rede sem fio requer menor investimento em comparação com outras tecnologias, pois demanda custos baixos na sua infra-estrutura externa [9]. O WiFi (802.11) e WiMax (802.16) são os padrões para redes sem fio de banda larga. O WiMax é um padrão

³ As redes de modem a cabo dividem a área de cobertura em células, sendo que cada célula é constituída por um grupo de assinantes.

recentemente adotado pela IEEE para rede de acesso fixo ou móvel. Oferece taxa de até 70 Mbps em distâncias de até 5 km. O WiFi é um padrão mais maduro que o WiMax, sendo mais utilizado [9]. Permite operar com taxas de transmissão de 10 Mbps até 50 Mbps em distâncias de até 100 m. Estas duas tecnologias apresentam largura de banda suficiente para suportar aplicações de vídeo. Porém, como a largura de banda é compartilhada por um grande número de usuários, esta tecnologia é útil somente para aplicações de navegação na web, mas não para serviços de banda larga. Além disso, redes sem fio compartilham a mesma desvantagem das tecnologias baseadas em fios, sendo limitadas em distância para altas taxas de transmissão. Portanto, a largura de banda oferecida dependerá de condições físicas. A vantagem da tecnologia sem fio é poder cobrir diferentes espaços geográficos, sendo utilizada em locais de difícil acesso para a instalação de fibras ópticas ou locais públicos (aeroportos, hotéis, espaços abertos, cafés e outros), onde há confluência de usuários móveis.

Nas seções seguintes será abordada detalhadamente a tecnologia de fibra óptica.

1.1.1 Tecnologia em Fibra Óptica

Os custos são um fator chave para a introdução da fibra nas redes de acesso. Portanto, o objetivo é buscar tecnologias de baixo custo e gerar renda por meio de serviços de banda larga que justifiquem o investimento.

Algumas configurações foram propostas para otimizar a arquitetura, sendo que uma classificação pode ser feita de acordo com o ponto que a fibra alcança. Esta classificação divide as instalações de fibra óptica nas seguintes categorias: fibra até a residência (*fiber to the home* - FTTH), fibra até o prédio (*fiber to the building* - FTTB) e fibra até o meio fio (*fiber to the curb* - FTTC), que são denominadas FTTx (*fiber to the x*), conforme mostra a Figura 1.1. A arquitetura FTTC distribui a informação aos usuários utilizando uma única (*optical network unit* – ONU) e é a arquitetura mais implementada. Na ONU, o sinal óptico da

fibra é convertido em sinal elétrico e pode ser transportado aos usuários por fio de cobre, cabo coaxial ou conexão sem fio.

Figura 1.1 - Arquitetura FTTx.

Cada uma das configurações mencionadas pode ser implementada utilizando uma determinada arquitetura e topologia. Os custos são fortemente afetados pela configuração da topologia⁴ da fibra óptica e pela configuração utilizada para fornecer o serviço a usuários individuais [2], [10]. Em geral, a rede de acesso baseada em fibra óptica pode ser instalada utilizando-se fibra dedicada ou compartilhada.

Uma infra-estrutura de fibra óptica dedicada geralmente é referida como uma rede ponto a ponto (*point to point* - P2P), conforme ilustrado na Figura 1.2. Ela conecta um usuário à central por meio de uma fibra óptica dedicada. A rede P2P baseada em fibra apresenta uma infra-estrutura cara pela quantidade de fibra empregada e dos dispositivos optoeletrônicos necessários no final de cada fibra. Por exemplo, em uma rede com N usuários a uma distância L seriam necessários $2N$ transceptores e um comprimento de fibra total igual a NL (supondo-se a fibra operando em modo bidirecional).

⁴ A topología é a disposição física em que se interligam os nós de uma rede.

Figura 1.2 - Rede P2P interligando uma central com N usuários [7].

A arquitetura de fibra compartilhada permite que uma simples fibra seja compartilhada por várias dezenas de usuários. Esta fibra é instalada o mais perto possível dos usuários e, a partir deste ponto, é dividida em fibras individuais até os usuários. Esta divisão pode ser realizada de duas maneiras: rede ativa e PON. A rede ativa utiliza um multiplexador ativo. Este dispositivo contém elementos para multiplexação e demultiplexação de sinais e dispositivos optoeletrônicos nas entradas e eletroópticos nas saídas. Embora reduza os custos de cabeamento da rede dedicada, esta configuração aumenta os custos de transmissão do sistema e os custos de instalação. Por exemplo, a configuração mostrada na Figura 1.3 necessitará de uma fibra de comprimento L , mas a quantidade de transceptores aumenta por um fator $2N + 2$. Além disso, a falta de transparência óptica em toda a topologia impede que novos serviços de taxas mais altas sejam adicionados sem também atualizar o multiplexador [10].

Figura 1.3 - Rede ativa utilizando um multiplexador ativo para conectar N usuários.

A PON é instalada substituindo-se os componentes ativos da infra-estrutura externa, no caminho do sinal entre a fonte e o destino (Figura 1.3), por componentes passivos (emendas, divisor/combinador e acopladores), uma vez que grande parte dos custos de instalação e manutenção é proveniente dos componentes ativos. Os divisores passivos dividem a potência do sinal entre todos os usuários na transmissão *downstream*, limitando o número de usuários que podem ser suportados pela estrutura. Nesta infra-estrutura é estabelecida uma comunicação ponto multiponto (*point to multipoint* – P2MP) do terminal de linha óptica (*optical line terminal* – OLT) às ONUs, dividindo o sinal enviado pela central entre todas as ONUs. Por outro lado, os custos de cabeamento são similares, mas os custos do sistema de transmissão óptica são reduzidos, já que um simples transmissor e receptor são utilizados na central.

A Figura 1.4 mostra um exemplo de uma rede PON com N usuários, na qual há $N + 1$ transceptores e uma fibra de comprimento L .

Figura 1.4 - Rede óptica passiva conectando N usuários [7].

As redes PON se tornaram atrativas para introduzir fibra óptica nas redes de acesso em virtude das vantagens que apresentam em comparação com as outras tecnologias descritas anteriormente. Elas apresentam infra-estrutura mínima de fibra óptica, não necessitam de alimentação externa para os dispositivos empregados e são “escaláveis”. Este tipo de rede está sendo amplamente difundida no Japão, Coréia e Estados Unidos [8], [11], [12].

As redes PON podem ser implementadas em diversas topologias, sendo mais empregada a topologia em árvore (Figura 1.4). Estas topologias compartilham o canal de transmissão entre todos os usuários, tornando o acesso mais crítico na direção *upstream*, dos usuários para a central, em razão das características físicas dos divisores/combinadores passivos utilizados na infra-estrutura. Portanto, é necessário haver controle para o acesso ao canal, com a finalidade de evitar colisão e compartilhar de maneira eficiente a largura de banda disponível. Este controle é executado na camada de enlace de dados. Na rede PON é necessário adequar os protocolos existentes ou definir novos protocolos para realizar as tarefas de controle de acesso ao meio.

Existem dois protocolos dominantes para a camada de enlace de dados na arquitetura PON: o protocolo ATM (*asynchronous transfer mode*) e *Ethernet*. A tecnologia APON utiliza o protocolo ATM, a EPON utiliza o protocolo *Ethernet*, enquanto a GPON (*Gigabit PON*) utiliza o protocolo genérico de formatação de quadros (*generic framing protocol* - GFP), permitindo transportar tanto quadros⁵ *Ethernet* quanto células ATM. O protocolo ATM foi projetado para atender múltiplos serviços e é bastante usado em redes metropolitanas. Porém, o uso nas redes LAN é restrito [13], [14]. Por outro lado, observou-se a consolidação do domínio do protocolo *Ethernet*, utilizado amplamente nas redes LAN e ganhando espaço nas redes metropolitanas [15].

Inicialmente, a tecnologia APON foi utilizada pelas operadoras de telecomunicações, principalmente nos Estados Unidos [11]. Posteriormente, as operadoras adotaram o padrão EPON, sendo introduzido em grande escala no Japão [12]. A tecnologia GPON é a evolução da APON. Acredita-se que esta tecnologia pode ganhar espaço nas redes de acesso, em

⁵ Quadro: É um conjunto de dados de nível mais baixo, gerados na camada de enlace do modelo OSI (um pacote pode ser dividido em vários quadros).

virtude de oferecer maiores taxas de transmissão e dar suporte a serviços de dados e TDM nos formatos nativos. Porém, ela realiza um encapsulamento adicional nos quadros.

A EPON reúne simplicidade do *Ethernet* e baixos custos da infra-estrutura da PON [15]. Devido à predominância IP/*Ethernet* e a necessidade de manter transparência nas redes (interoperabilidade com as redes LAN *Ethernet* existentes), eliminando tempos de processamento para a conversão de protocolos, se considera a tecnologia EPON uma boa opção para as redes de acesso [2], [14], [16]. Além disso, novos critérios de qualidade de serviço (*quality of service* - QoS) na EPON permitem dar suporte a classes de serviço [3].

O controle de acesso ao meio pode ser implementado utilizando-se técnica como acesso múltiplo por divisão no tempo (*time division multiple access* - TDMA), acesso múltiplo por divisão em comprimento de onda (*wavelength division multiple access* - WDMA), acesso múltiplo por divisão em sub-portadora (*subcarrier division multiple access* - SCMA) ou acesso múltiplo por divisão em código óptico (*optical code division multiple access* - OCDMA) [5], [6]. O esquema TDMA tem sido o mais empregado, uma vez que permite infra-estrutura economicamente mais viável.

A rede EPON foi especificada pelo grupo de trabalho IEEE802.3ah *Ethernet* na primeira milha, que define um novo protocolo para o controle de acesso ao meio com base em TDM, denominado protocolo de controle multiponto (*multipoint control protocol* - MPCP). Este protocolo especifica mecanismos de controle como autodescoberta, registro e alcance (*ranging*) e fornece uma infra-estrutura de sinalização para coordenar a transmissão dos dados na infra-estrutura. Porém, não foi especificado o algoritmo de alocação de largura de banda baseado no MPCP, permitindo que ele seja proposto pelos fornecedores.

O algoritmo de alocação de largura de banda é encarregado de gerenciar as transmissões das diferentes ONUs. Assim, ele estabelecerá várias políticas para alocar a largura de banda com base em TDM, permitindo que todas as ONUs utilizem o canal uma

fração do tempo para realizar sua transmissão livre de colisão. Vários algoritmos de alocação dinâmica de largura de banda (*dynamic bandwidth allocation* - DBA) foram propostos para EPON [3], [5], [6], [13], [14], [16]-[23].

1.2 Objetivos

O objetivo desta pesquisa é estudar e avaliar alguns algoritmos de alocação dinâmica de largura de banda propostos para redes EPON. Primeiramente, o estudo será centrado nos esquemas propostos com base nas técnicas TDM, estudando os algoritmos que realizam a alocação dinâmica de largura de banda, que integram os benefícios da multiplexação estatística e, posteriormente, os algoritmos DBA que dão suporte a classes de serviço, integrando a programação por prioridade e enfileiramento prioritário. Será desenvolvido um programa que simule o funcionamento de uma rede EPON com cada um destes algoritmos. Foram considerados tráfegos Poissoniano e auto-similar. Os resultados têm com base parâmetros que medem o desempenho, como atraso médio do quadro, tamanho médio da fila e probabilidade de perda de quadros. Posteriormente, foi feita a integração das técnicas WDM aos esquemas TDM com a finalidade de ampliar a disponibilidade de largura de banda oferecida pela EPON. Para tanto, foi modificado um algoritmo para permitir ao sistema EPON, baseado em TDM, operar se algumas ONUs são atualizadas para WDM, resultando em estruturas híbridas que melhoram o desempenho do sistema. Por último, foi integrado o suporte a diferentes classes à estrutura híbrida.

CAPÍTULO 2 Redes Ópticas Passivas

As redes PON apresentam várias vantagens em comparação a outras tecnologias de rede de acesso, dentre as quais se destacam [2], [16]:

1. Alcançam maiores distâncias entre a central e os usuários. O enlace local pode operar em distâncias de até 20 km;
2. Minimizam os custos da infra-estrutura externa entre a central e as ONUs, já que não apresenta componentes eletrônicos, fato que simplifica o trabalho dos operadores de rede e reduz os custos com manutenção e alimentação;
3. Minimizam o comprimento da fibra utilizada na infra-estrutura da rede;
4. Fornecem alta confiabilidade porque não usam componentes eletrônicos, que estão mais propensos a falhas;
5. Operam como rede de difusão (*broadcasting*) na transmissão *downstream*, permitindo o tráfego de vídeo sobre IP ou vídeo analógico;
6. São “escaláveis”, pois permitem aumentar a taxa de bits facilmente ou operar com comprimentos de onda adicionais. Está é a característica mais crucial da rede PON, sendo simples a atualização, já que não precisa fazer atualizações na infra-estrutura externa da rede.

Podem ser utilizadas em configurações FTTH, FTTB, FTTC ou FTTCab, como mostradas na Figura 2.1. Estas arquiteturas buscam explorar a ampla largura de banda disponibilizada pela fibra óptica. A arquitetura FTTH permite que a fibra chegue até o local do usuário, porém é uma solução que apresenta custos mais elevados decorrentes da utilização

de componentes em maior quantidade, porque as ONUs são localizadas no local de cada usuário. Uma redução de custo pode ser obtida por meio do compartilhamento da ONU por vários usuários. As configurações FTTB, FTTC e FTTCab realizam esse compartilhamento sendo, portanto, mais atraentes em termos de custos em comparação à FTTH. Essas arquiteturas são sistemas híbridos que utilizam trechos longos em fibra e trechos curtos em cobre. As ONUs operam com um multiplexador mais complexo, já que atendem vários usuários.

Uma variação da FTTC é a arquitetura de fibra até o armário (*fiber to the cabinet* - FTTCab), que reduz o número de ONUs empregadas mediante a utilização de trechos de cobre mais longos e em maior quantidade. Em FTTB a fibra chega ao prédio e a partir daí são empregados vários enlaces para o compartilhamento do acesso, pois normalmente essas instalações são ocupadas por vários usuários ou empresas. Em FTTCab e FTTC a fibra está um pouco mais distante dos usuários e utiliza acesso x-DSL para compartilhar a conexão, sendo a tecnologia VDSL mais recomendável para utilizar a largura de banda disponível. As configurações FTTC e FTTCab apresentam os custos de investimento iniciais mais baixos. Porém, a arquitetura FTTH está sendo utilizada no Japão (um milhão de assinantes até 2003) e alguns países da Europa (Suécia, Itália) [7].

Figura 2.1 - Implementação das redes de acesso FTTx, com a tecnologia PON.

2.1 Componentes das Redes PON

Um sistema de comunicações ópticas é composto por transmissores, fibras, acopladores, filtros, amplificadores e receptores. Alguns componentes que caracterizam as redes PON são:

1. **OLT:** Terminal de linha óptica. Está localizado na central, constituindo-se em porta de enlace entre a rede de acesso e a rede metropolitana. O OLT controla e administra a transmissão das ONUs, precisando de um receptor que opere em modo rajada (volumes esporádicos de tráfego). Rajadas são conjuntos de bits vindos de uma determinada ONU. Portanto, é preciso controlar os diferentes níveis de amplitude do sinal, já que as ONUs estão localizadas em distâncias diferentes do OLT [2], [24].
2. **ONU:** Unidade de rede óptica. A sua função principal é fornecer acesso aos usuários concentrando o tráfego até que possa transmiti-los. A ONU está localizada em distâncias longas ou curtas do usuário final, como na configuração FTTCab e FTTC,

respectivamente, e na locação do usuário final, como na configuração FTTH e FTTB. Nestas duas últimas, a ONU recebe a denominação de terminal de rede óptica (*optic network terminal* - ONT). A conversão eletroóptica é realizada na ONU.

3. **Divisor Passivo (*Splitter*)**: É um dispositivo passivo capaz de combinar e dividir o sinal óptico:

- a. Em sentido *downstream* este dispositivo divide o sinal de entrada e o direciona para todas as portas de saída que estão ligadas com as ONUs;
- b. No sentido *upstream* combina todos os sinais enviados desde as ONUs em direção ao OLT. Cada ONU estabelece comunicação direta com o OLT, mas não com as outras ONUs.

Os dispositivos utilizados nas redes PON, como divisores/combinadores, reduzem significativamente o custo de implantação da fibra óptica nas redes de acesso, mas a arquitetura da rede também desempenha um papel fundamental neste objetivo.

2.2 Arquitetura de Redes PON

As redes PON enfrentam vários desafios de implementação prática, independentemente da topologia. A primeira etapa de projeto consiste na implementação da camada de enlace de dados, na qual se define o protocolo que será utilizado, caracterizando desta forma os tipos de redes PON. Em seguida, implementam-se as operações de controle de acesso ao meio, com base em esquemas de acesso múltiplo para a transmissão *upstream* e esquemas de multiplexação para a transmissão *downstream* [16].

2.2.1 Topologia das Redes PON

As redes PON podem ser implementadas com várias topologias físicas: árvore, anel e barramento, conforme mostrado na Figura 2.2 [2], [10]. Estas infra-estruturas físicas apresentam uma topologia lógica⁶ P2MP na direção *downstream* e P2P na direção *upstream*. Utilizando acopladores com *taps* (barramento) ópticos 1:2 ou divisores ópticos 1:N, a PON pode ser flexivelmente estendida em alguma dessas topologias físicas.

A topologia em barramento apresenta um grande número de pontos individuais de acesso passivo utilizando *taps* ópticos; a topologia em árvore utiliza um ou mais divisores passivos 1:N, podendo apresentar uma configuração em cascata; a topologia em anel apresenta uma infra-estrutura similar à topologia em barramento, sendo implementada também por *taps* ópticos.

Essas topologias podem apresentar na sua infra-estrutura um ou mais OLTs, o que aumenta a confiabilidade do sistema, caso uma das OLTs apresente falha [10]. Também é possível estabelecer várias rotas entre o OLT e as ONUs, assim como vários caminhos redundantes na topologia inteira ou somente em uma parte da PON.

a. Topologia em árvore, com duas possibilidades de retorno.

⁶ Topologia lógica: define a forma como é realizada a comunicação entre os componentes da rede, independentemente da topologia física.

b. Topologia em barramento.

c. Topologia em anel.

Figura 2.2 - Topologia das redes PON

Vários aspectos são considerados ao se instalar uma determinada topologia. Uma delas é a simplicidade da topologia que permita a instalação e ampliação, sendo a topologia em árvore a mais adequada. Outra consideração é a distribuição geográfica dos usuários que serão atendidos. A topologia em árvore é mais adequada quando os usuários estão agrupados e as outras topologias quando eles estão mais dispersos.

A seguir serão estudadas as técnicas de acesso múltiplo e multiplexação para o gerenciamento da transmissão no canal compartilhado.

2.2.2 Técnicas de Acesso Múltiplo e Multiplexação

Nas redes PON é necessário controlar o acesso múltiplo ao canal na transmissão *upstream*, em razão das ONUs compartilharem a fibra tronco. Dessa forma, elimina-se a possibilidade de colisão entre os sinais emitidos pelas ONUs. As técnicas disponíveis mais conhecidas para acesso múltiplo são TDMA, WDMA, SCMA, OCDMA [16].

2.2.2.1 TDMA

O esquema TDMA permite que cada ONU utilize um *timeslot* fixo ou variável explorando toda a largura de banda do canal. A largura de banda disponibilizada para cada ONU pode ser estabelecida com base na necessidade, que é verificada periodicamente, ou baseada em contratos de serviço (*service level agreement* - SLA). O SLA é um contrato de caráter legal, no qual a prestadora de serviços se compromete a prestar o serviço a uma empresa sob certas condições, indicando os requisitos mínimos aceitáveis para o serviço proposto. Os quadros *upstream* de diferentes ONUs são transmitidos de tal forma que alcancem o OLT de forma seqüencial, o que requer uma sincronização cuidadosa das transmissões, considerando o período de tempo que leva a propagação do sinal de cada ONU até o OLT, para evitar colisão dos sinais. O controle da transmissão normalmente é realizado na central pelo OLT, indicando o instante em que a ONU deve enviar seus dados. Como este esquema utiliza um mesmo comprimento de onda para a transmissão, é necessário só um tipo de transceptor para todas as ONUs, facilitando a operação e manutenção do sistema. Conseqüentemente, os custos são menores.

2.2.2.2 WDMA

O esquema WDMA permite compartilhar a fibra, disponibilizando um comprimento de onda diferente para cada ONU. Dessa forma, todas as ONUs podem efetuar a transmissão ao mesmo tempo sem interferência, utilizando a largura de banda existente com mais eficácia. Há três grandes vantagens: primeiro, a largura de banda total de cada comprimento de onda está disponível para uma única ONU; segundo, ao contrário do esquema TDMA que precisa de sincronização, no WDMA os canais são independentes; terceiro, não requer um sofisticado algoritmo MAC para gerenciar o cronograma de transmissões das ONUs. Entretanto, há desvantagens em relação a custos. Cada ONU deve estar equipada com um diodo laser que opere em um comprimento de onda específico, e cada nova ONU adicionada deve operar em

um comprimento de onda diferente das que já foram registradas. Uma solução alternativa é equipá-la com um transmissor que opere em diferentes comprimentos de onda, porém isso dificultaria o registro dos comprimentos de onda utilizados e também a operação e manutenção. Adicionalmente, o OLT deve estar equipado com um conjunto de transmissores. Assim, o esquema WDM apresenta custos elevados, na implementação da infra-estrutura tanto do OLT e das ONUs.

2.2.2.3 SCMA

O esquema SCMA modula o sinal de cada ONU em diferentes frequências de portadora elétrica, modulando, subsequentemente, a intensidade da luz do diodo laser [5]. O termo multiplexação por sub-portadora é utilizado para diferenciar esta técnica, que utiliza sub-portadora elétrica e portadora óptica, do esquema WDM. Neste esquema, cada ONU transmite basicamente na mesma frequência óptica, já que há uma mínima diferença entre elas. Portanto, o desempenho de uma rede SCMA é seriamente degradado pela interferência de batimento óptico (*optical beat interference* - OBI), que é ocasionado quando a frequência óptica de um transmissor é muito próxima à frequência de outro, a diferença entre elas pode resultar em ruído de batimento no fotodetector do receptor [6], [25].

2.2.2.4 OCDMA

A técnica OCDMA identifica cada ONU por meio de uma palavra de código, a qual está representada em domínio óptico por uma determinada sequência de pulsos. Este esquema não apresenta um limite fixo do número de usuários que podem ser suportados como os anteriores esquemas. A limitação acontece de forma estatística, proporcionalmente ao aumento do número de usuários no sistema, resultando no aumento na interferência entre os canais. Uma desvantagem deste esquema está associada à necessidade de os dispositivos ópticos terem que manipular sinais ópticos em taxas muito mais elevadas que a taxa de dados do usuário, sendo necessários equipamentos mais sofisticados e de custos mais elevados [5].

2.2.2.5 Esquemas Híbridos

Também é possível implementar soluções PON híbridas (HPON) [24]. As técnicas WDM e TDM podem ser combinadas quando um subconjunto de ONUs compartilharem um comprimento de onda comum. Esta arquitetura mantém a “escalabilidade”, já que novos usuários podem ser adicionados a cada grupo sem a necessária adição de novo *hardware* ao OLT. A HPON foi proposta para tornar mais simples, flexível e com melhor custo-benefício a migração da tecnologia TDM para WDM. Outra proposta híbrida é a implementação do esquema TDM para o envio de dados e SCM para o envio do sinal de vídeo *broadcast* [6]. Um comprimento de onda pode ser adicionado para a operação *downstream* que transporta um número limitado de canais de TV para cada ONU.

A Tabela 2.1 mostra algumas vantagens e desvantagens de cada tecnologia de acesso múltiplo descrita anteriormente.

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens das tecnologias de acesso ao meio em PON.

Acesso Múltiplo	Vantagens	Desvantagens
TDMA	Permite a cada ONU utilizar uma fração da capacidade do comprimento de onda; No OLT é necessário somente um transceptor independentemente do número de ONUs; Conseqüentemente, os custos são menores.	Necessita de um gerenciamento mais complicado que o esquema WDM; As ONUs devem estar sincronizadas.
WDMA	Fornecer uma largura de banda alta; A implementação é muito simples; O esquema WDM pode utilizar um separador de comprimento de onda (<i>arrayed waveguide grating</i> - AWG) em lugar do divisor de potência [6]. Portanto, não são necessárias ferramentas de segurança para a transmissão na direção <i>downstream</i> , já que outras ONUs na PON não têm acesso a outros comprimentos de onda <i>downstream</i> . Fica assim garantida a segurança na rede por sua arquitetura física	Custo e “escalabilidade”. Os altos custos dos equipamentos requeridos encarecem ainda mais o emprego destas soluções; Uma vez que uma ONU é adicionada ao sistema, também deve ser atualizada a infra-estrutura do OLT (novo transceptor), a não ser que haja uma quantidade de transmissores de reserva. Todos estes inconvenientes tornam o esquema WDM caro e momentaneamente inviável ou restrito.
SCMA	Implementação simples.	O sinal é degradado pela interferência de batimento óptica; utiliza-se um receptor no OLT de largura de faixa elétrica de pelo menos duas vezes o agregado das N taxas de transmissão dos canais.
OCDMA	Não estabelece um limite fixo no número de usuários; prove segurança.	A interferência entre os comprimentos de onda aumenta com o número de usuários; Os componentes físicos devem operar a taxas maiores que a taxa de dados dos usuários.

Das diferentes técnicas de multiplexação descritas, a mais empregada tem sido o esquema TDM, uma vez que permite uma infra-estrutura economicamente mais viável [5], [6]. É importante ressaltar que este fato não impede que posteriormente possam ser atualizadas para utilizar WDM.

Uma vez que as redes PON utilizam elementos passivos na sua infra-estrutura, os protocolos também precisam ser devidamente adaptados à nova arquitetura, de tal forma que garantam a transmissão livre de erros.

2.3 Tipos de Redes PON

Diferentes arquiteturas de redes de acesso baseados em PON foram padronizadas. Estes padrões diferenciam-se principalmente pelo protocolo que utilizam na camada de enlace de dados. A Tabela 2.2 apresenta um resumo das vantagens e desvantagens dos protocolos mais empregados: ATM, que utiliza células de comprimento fixo, 53 *bytes*, e *Ethernet*, que utiliza quadros de comprimentos variáveis, 64 *bytes* até 1518 *bytes* [16].

Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens dos protocolos utilizados na camada de enlace de dados em PON.

Protocolo	Vantagens	Desvantagens
ATM	Pode facilmente implementar várias políticas e garantir QoS no OLT e na ONU. Desta forma fornece melhor suporte para tráfego em tempo real como voz e vídeo.	O datagrama IP deve ser dividido em células ATM com a finalidade de atravessar a rede PON e ser reagrupado no nó destino. Este fato adiciona maior complexidade aos equipamentos e, portanto, seus custos são aumentados. A encapsulação de tráfego IP em células ATM consome os recursos da rede desnecessariamente (células corrompidas na transmissão invalidam todo o datagrama IP, mas as células restantes que levam porções do mesmo datagrama IP continuam se propagando).
Ethernet	Mais conveniente para transportar tráfego IP. Equipamentos baratos. “Escalável” (100 Mbps, 1 Gbps, 10 Gbps). Operável entre grande variedade de equipamentos.	Requer implementação de novas técnicas para garantir QoS, para dar suporte a tráfego em tempo real. Apresenta suporte para tráfego em rajada, mas não para tráfego em taxa de bits constante (<i>Constant Bit Rate</i> - CBR) ou TDM.

Atualmente foram especificados os padrões para APON ou BPON, EPON e GPON [26], cada um destes especifica operações diferentes para a subcamada de controle de acesso ao meio utilizando o esquema TDM [5].

2.3.1 APON e BPON

Em 1995, o comitê *Full Service Access Network* (FSAN) [27], criado com o objetivo de regulamentar o padrão de serviço de banda larga, congregou esforços com a finalidade de padronizar as redes PONs. Em 1997, foi proposta a especificação para APON, que utiliza ATM como seu protocolo de camada 2 e que, mais tarde, foi adotada pela União Internacional de Telecomunicações ITU-T na recomendação G.983.1 [28]. Este primeiro padrão especifica a arquitetura APON com uma taxa de bits simétrica de 155 Mbps para a transmissão tanto *upstream* quanto *downstream*. Posteriormente, em 2001, esta especificação foi melhorada, permitindo transmissão assimétrica de 155 Mbps *upstream* e 622 Mbps *downstream*, assim como transmissão simétrica de 622 Mbps [26]. O nome APON foi logo substituído por PON de banda larga (*broadband* PON - BPON) com a finalidade de enfatizar que não era limitado a tráfego ATM. Os padrões para BPON especificam desde a camada física até as tarefas de operação, administração, manutenção e provisionamento (*operation, administration, maintenance and provisioning* - OAM&P)[24].

2.3.2 EPON

Em janeiro de 2001, o IEEE formou um grupo de trabalho, denominado *Ethernet* na primeira milha (*Ethernet in the first mile* - EFM). O objetivo deste grupo é ampliar a aplicação de *Ethernet* às redes de acesso de assinante, aproveitando as características de baixo custo e simplicidade desta arquitetura para possibilitar a utilização de tecnologia de menor custo em PONs. A EPON transporta os dados encapsulados em quadros *Ethernet*, que facilita

o transporte de pacotes⁷ IP e a operabilidade entre as LANs *Ethernet* instaladas. As redes EPON estão especificadas no padrão IEEE 802.3ah, compreendendo a camada física e camada de enlace de dados [17], sendo a taxa máxima de transmissão 1 Gbps.

2.3.2.1 Extensões de EPON Futura

Atualmente, um novo projeto da EPON foi iniciado para operar em taxas maiores. A IEEE formou o grupo de trabalho P802.3av para definir a camada física que permita operar *downstream* em 10 Gbps e *upstream* em 1 Gbps ou 10 Gbps. Esta otimização forneceria um aumento significativo na capacidade de sistemas TDM PON [9].

2.3.3 GPON

Em 2001, o grupo FSAN começou o projeto para especificar um padrão mais flexível que suportasse taxas de transmissão mais elevadas em redes PON. A arquitetura GPON foi elaborada e aprovada pela ITU-T entre os anos de 2003 e 2004, resultando nas seguintes especificações [29]: a G.984.1 detalha as características gerais do sistema; a G.984.2 especifica os requisitos para a camada física e a G.984.3 especifica a camada de enlace de dados. A GPON permite operar com taxas de 1,25 Gbps e 2,5 Gbps na direção *downstream* e 155 Mbps, 622 Mbps, 1,5 Gbps e 2,5 Gbps na direção *upstream*. A encapsulação é feita utilizando um protocolo genérico de formatação de quadros (*generic framing protocol* - GFP), sendo flexível tanto para o atendimento de tráfego em rajada quanto para tráfego em taxa de bit constante (*constant bit rate* - CBR) [24]. O sistema GPON pode operar em modo de quadros *Ethernet*, em modo de células ATM ou em modo misto [5]. O GPON combina as vantagens de QoS de ATM e a eficiência de *Ethernet*.

⁷ Pacotes: Conjunto de dados manipulados na camada de transporte e na camada de rede do modelo OSI, que contém o endereçamento virtual (IP).

2.3.4 Características das abordagens BPON/GPON e EPON

Na Tabela 2.3 podem-se observar características específicas de cada um dos tipos de redes PON.

Tabela 2.3 - Padrões para APON/BPON, GPON e EPON e algumas características [8].

Arquiteturas	APON/BPON	EPON	GPON
Padrões	ITU.T G.983	IEEE 803.ah	ITU.T G.984
Tamanho de células do pacote de dados	53 bytes	Variável de 64 bytes até 1518 bytes	Variável de 53 bytes até 1518 bytes
Largura de banda máxima	622 Mbps	1 Gbps	2,5 Gbps.
Quadro	ATM	Ethernet	GFP/ATM
Comprimento de onda <i>downstream</i>	1480 nm a 1500 nm	1490 nm ou 1510 nm	1480 nm a 1500 nm
Comprimento de onda <i>upstream</i>	1260 nm a 1360 nm	1310 nm	1260 nm a 1360 nm
Tráfego Voz	TDM	VoIP ou TDM	TDM
Tráfego Vídeo	1550 nm (RF)	1550 nm (RF/IP)	RF/IP
Usuários na PON	32	16/32	64
Largura de banda média por usuário	20 Mbps	60 Mbps/ 30 Mbps	40 Mbps
Custos estimados	Baixo	Mais baixo	Médio

A operação ATM é realizada por meio da comutação de pequenos datagramas de tamanho fixo (chamados de células) em canais virtuais (serviço orientado a conexão). O pequeno tamanho fixo das células e a capacidade de reservar a largura de banda necessária por meio das conexões virtuais permite à tecnologia ATM garantir baixas latências às

transmissões de voz e vídeo, sendo requisito fundamental em telefonia, área onde ela tem sido bastante empregada.

Em 1995, quando a iniciativa da FSAN havia começado, esperava-se que ATM se tornasse a tecnologia prevalecente nas redes LAN, metropolitanas e de longa distância. De fato, muitas redes metropolitanas foram amplamente substituídas e expandidas com a utilização de equipamentos ATM [30]. Entretanto, o ATM não teve o mesmo sucesso nas redes LAN quanto o *Ethernet*. Devido aos custos elevados dos equipamentos como interfaces de rede (*Network Interface Cards* - NIC) e comutadores (*switches*), a complexidade de manutenção das conexões e o *overhead* envolvido ao transportar tráfego IP, tornando essas redes pouco atraentes para as operadoras [13], [14]. Entretanto, o *Ethernet* é padrão aceito universalmente, com aproximadamente 320 milhões de portas⁸ instaladas ao redor do mundo e vem ganhando espaço nas redes metropolitanas [15].

As considerações econômicas são a chave quando se planeja a introdução da fibra nas redes de acesso. Inicialmente, várias operadoras instalaram sistemas BPON, porém a previsão de implantação em grandes quantidades e a correspondente redução dos custos dos equipamentos não ocorreu. Por outro lado, a EPON emergiu como uma tecnologia bem sucedida com 5,5 milhões de linhas implantadas no mundo em apenas três anos [31], sendo usada majoritariamente no Japão e também considerada em outros países asiáticos, empregando uma arquitetura de divisores em cascata devido à alta densidade de demanda [6], [12]. Por outro lado, em 2006, a FSAN patrocinou a avaliação de interoperabilidade da GPON pelos fornecedores, demonstrando sua flexibilidade. Acredita-se que a grande maioria de redes de acesso nos Estados Unidos adotará GPON [31].

⁸ Soquete ou conexão física permitindo a transferência de dados entre um canal de comunicação interno de computador e um outro dispositivo externo.

O capítulo seguinte introduz o estudo da rede EPON. Apresenta-se o estado da padronização da camada de enlace de dados, especificamente na tarefa de controle de acesso ao meio.

CAPÍTULO 3 Rede EPON

A rede EPON destaca-se como uma solução para as redes de acesso ópticas de banda larga [2], [18], [32]. A implementação dos requisitos de projeto vem sendo promovida pelo grupo de trabalho IEEE 802.3ah *Ethernet* na primeira milha⁹ (*Ethernet in the first mile* - EFM). Este grupo tem como desafio elaborar o projeto do protocolo para o controle de acesso ao meio e suportar vários tipos de serviços com diferentes requisitos de QoS [19].

3.1 Ethernet

A Ethernet é um padrão que especifica como os dados serão transmitidos através da rede, operando nas camadas de mais baixo nível do modelo OSI. A Tabela 3.1 mostra a correspondência entre as camadas do modelo OSI e as camadas da especificação IEEE 802, que detalha os padrões para as redes LAN e metropolitana. A padronização IEEE 802 é composta de três camadas, que equivalem às camadas 1 e 2 do modelo OSI. A camada física se encarrega principalmente da transmissão e recepção empregando meios variados como cabo coaxial, par trançado e fibra óptica. A camada de enlace de dados é dividida em duas subcamadas: a de controle de acesso ao meio (*media access control* - MAC) e a de controle de enlace lógico (*logical link control* - LLC). A subcamada MAC executa as funções necessárias para o controle de acesso ao meio físico porque o canal de comunicação é compartilhado; agrega a direção MAC da fonte e o destino em cada quadro transmitido; delimita o tamanho dos quadros adicionando bits (*flags*) para que o receptor possa detectar o início e fim do quadro e descarta quadros errados. O LLC é a interface comum às camadas superiores, permitindo operar com vários protocolos de alto nível [33].

⁹ A última milha é também conhecida como primeira milha, para realçar sua importância.

Existem vários padrões IEEE 802 que especificam funcionalidades e protocolos como o padrão IEEE 802.2, que se refere ao funcionamento da camada LLC, e os padrões 802.3, para redes *Ethernet*; 802.4, para redes *token bus*; 802.5, para redes *token ring*, que especificam a subcamada MAC e a camada física. Estas redes foram bem aceitas e bastante utilizadas na construção de redes locais baseados em datagramas.

Tabela 3.1 - Relação entre o modelo OSI e as camadas LAN do IEEE

	Modelo OSI	Camadas LAN IEEE 802	Padronização		
7	Aplicação	Protocolos de alto nível			
6	Apresentação				
5	Seção				
4	Transporte				
3	Rede				
2	Enlace de dados	Controle do Enlace Lógico (LLC)	802.2 LLC		
		Controle de Acesso ao Meio	802.1 Bridgest MAC		
1	Física		802.3	802.4	802.5
		Física	CSMA/CD	TBUS	TRING

3.1.1 Subcamada MAC

Esta subcamada tem a finalidade de gerar os quadros *Ethernet*, adicionando um cabeçalho aos dados que serão recebidos da subcamada LLC. Este cabeçalho inclui informações de endereço MAC dos nós emissor e receptor. O endereço MAC é uma identificação física única para a placa de rede, determinado pelo fabricante.

A estrutura do quadro *Ethernet* é mostrada na Figura 3.1. O *preâmbulo* marca o início do quadro junto com o delimitador de começo do quadro (*start of frame delimiter* - SFD), que formam parte de um padrão de sincronismo. Os campos seguintes indicam os endereços MAC *origem* e *destino*, cada um com 6 *bytes*. O campo *tipo* indica qual protocolo de rede está sendo transportado no quadro. Os dados que são enviados da camada imediatamente superior podem apresentar um comprimento mínimo de 46 e máximo de 1500 *bytes*. O PAD é utilizado para

completar o campo dos dados, caso não atinjam o mínimo. A sequência de verificação de quadro (*frame check sequence* - FCS) contém informação para o controle de erros.

Preâmbulo (7)	SFD (1)	MAC Destino (6)	MAC Origem (6)	Tipo 88-09 (2)	Dados e PAD (46 a 1500)	FCS (4)
---------------	---------	--------------------	-------------------	-------------------	----------------------------	---------

Figura 3.1 - Formato do quadro *Ethernet*.

Na transmissão é necessário manter um intervalo entre os quadros (*interframe gap* - IFG) de 96 *bits*, para o controle. Este intervalo deixará de existir caso ocorram colisões.

3.1.2 Camada Física

A camada física utiliza tipicamente o protocolo de acesso múltiplo por detecção de portadora com identificação de colisão (*carrier-sense multiple access/collision detection* - CSMA/CD) para o controle de acesso ao meio. Durante o processo de detecção de portadora o usuário que deseja transmitir verificará constantemente o estado do canal. Caso esteja livre, efetuará a transmissão, caso contrário aguardará um intervalo de tempo escolhido aleatoriamente até voltar a tentar novamente. O acesso múltiplo indica que vários usuários estão compartilhando o canal para a transmissão. No processo de identificação de colisão cada usuário será capaz de detectar uma colisão quando mais de um usuário estiver transmitindo ao mesmo tempo. Neste caso, a estação que detectou a colisão irá interromper imediatamente a transmissão e transmitirá uma sequência aleatória de bits para assegurar que todas as estações detectem a colisão. Este protocolo não gera nenhum tipo de prioridade para a informação.

Existem várias implementações de rede *Ethernet* em cabo coaxial ou par trançado. A rede *Ethernet* 10Base-T utiliza par trançado (*twisted par* - T) e opera em 10 Mbps. A rede *Ethernet* 100Base-T transporta os dados em 100 Mbps, utilizando os mesmos mecanismos que a 10Base-T e permite operar automaticamente tanto em 10 Mbps quanto em 100 Mbps. A rede *gigabit Ethernet* opera em taxas de 1 Gbps, podendo ser implementada com fibra óptica multimodo (1000Base-SX/LX), fibra óptica monomodo (1000Base-LX), cabo coaxial

(1000Base-CX) e cabo de pares de categoria 5, 5e ou 6 (1000Base-T). A rede 10Gigabit *Ethernet* opera em taxas de 10 Gbps empregando fibra óptica, que pode operar com um comprimento de onda numa taxa de 10 Gbps ou quatro comprimentos de onda em taxas de 2,5 Gbps em cada um deles, transmitindo simultaneamente [24], [34].

A subseção seguinte aborda a arquitetura das redes *Ethernet* aplicada a redes ópticas passivas.

3.2 Arquitetura de Redes EPON

Tipicamente, EPONs apresentam topologia física em forma de árvore, sendo constituídas de um OLT, um ou vários divisores/combinadores 1: N (N está entre 16 e 32) e várias ONUs. O OLT se encarrega de administrar o acesso das ONUs à fibra tronco. Recentemente, tem-se empregado transmissão bidirecional em fibra, utilizando comprimentos de onda distintos para transmissão *downstream* e *upstream* [3]. A ONU pode servir a usuários residenciais e empresariais (FTTH e FTTB) ou a vários usuários (FTTC e FTTCurb), variando sua complexidade para cada tipo e proporcionando transmissão de serviços de voz, vídeo e dados.

As propriedades direcionais do divisor/combinador óptico permitem que na direção *downstream* o OLT envie às ONUs o sinal por difusão (ver Figura 3.2), sendo recebida pela ONU de destino, de acordo com o identificador de enlace óptico (*logical link ID* - LLID). Esta característica da EPON se adapta perfeitamente à natureza de difusão do padrão *Ethernet*, o que permitirá serviços multimídia *downstream*, como vídeo por difusão. Na EPON o cabeçalho do quadro Ethernet contém campos adicionais e um deles é o LLID, que é utilizado para identificar cada ONU, sendo atribuído pelo OLT. Um valor especial para o LLID é reservado para mensagens por difusão enviada a todas as ONUs. No entanto, um aspecto importante a ser considerado é a segurança, uma vez que cada ONU tem acesso a

todos os dados enviados às outras ONUs na PON. Para solucionar este problema, são requeridas técnicas de criptografia para o tráfego *downstream* [6].

Figura 3.2 - Tráfego na direção *downstream* na EPON.

Na direção *upstream* as ONUs compartilham o canal. A ONU armazena em *buffers* a informação proveniente dos usuários até que possa realizar a transmissão da informação ao OLT, como ilustrado na Figura 3.3. As ONUs realizam a transmissão utilizando técnicas de multiplexação no tempo. As distâncias entre OLT e ONUs variam em trechos de 0 a 20 km e, portanto, o tempo de ida-e-volta (*round-trip time* - RTT) é diferente para cada ONU.

Figura 3.3 - Tráfego na direção *upstream* na EPON.

3.3 Protocolo para o Acesso Múltiplo

Uma vez que as ONUs compartilham o canal da fibra tronco, são necessários protocolos que permitam o acesso múltiplo para prevenir a ocorrência de colisões. Além disso, com a finalidade de fornecer qualidade de serviço, é necessário haver gerenciamento por prioridade da transmissão *upstream* para a implementação satisfatória da camada MAC das redes EPON.

O protocolo convencional CSMA/CD para controle de acesso ao meio em redes *Ethernet* causa várias degradações de desempenho em EPON. Isto acontece porque as ONUs não podem detectar facilmente uma colisão, em razão das propriedades direcionais do divisor/combinador passivo. Contudo, o OLT pode detectar uma colisão e informar as ONUs enviando um sinal de contenção. Entretanto, o tempo gasto por este procedimento reduziria enormemente a eficiência da rede. Uma solução para esta limitação foi proposta em [35], que é utilizar uma técnica chamada *loopback* óptico. Esta técnica propõe utilizar um divisor 3:N, mantendo uma das saídas ligada ao OLT e as outras duas em *loopback*, conforme mostra a Figura 3.4. Assim uma porção de potência do sinal transmitido *upstream* retornará às ONUs, permitindo, desta forma, às ONUs detectar qualquer possível colisão, cancelando imediatamente suas transmissões. Porém, cada ONU deve utilizar um receptor adicional operando no comprimento de onda *upstream* e um circuito para melhorar a sensibilidade da detecção de portadora, já que o ruído resultante da colisão dos sinais voltará com baixa potência. A adição do receptor aumenta o custo da rede. Além disso, nesta solução é difícil dar suporte a alguma forma de QoS para diferentes tipos de serviço, porque o sistema seria não-determinístico.

Figura 3.4 - Uma EPON utilizando acoplador em estrela *loopback*.

A seguir serão abordados detalhadamente os padrões especificados pelo grupo EFM IEEE 802.3ah, entre eles o protocolo para o acesso múltiplo.

3.4 IEEE 802.3ah

O grupo EFM IEEE 802.3ah é a principal estrutura de padronização das redes EPON. Este grupo tem por objetivo ampliar a aplicação de *Ethernet* em redes de acesso ópticas de banda larga, sendo necessário atuar na subcamada MAC e na camada física para garantir operabilidade do sistema. O grupo EFM é dividido em quatro subgrupos e os tópicos cobertos incluem *ponto a multiponto*, *OAM*, *ótica* e *cobre* [36]. Tipicamente, as ferramentas da OAM incluem o monitoramento de desempenho, testes do enlace de transmissão fim a fim (*loop-back*), detecção de falhas e isolamento, e processos de autodescoberta [32]. A subcamada MAC é um dos principais mecanismos a ser considerado no projeto da EPON. Ela deve empregar um mecanismo para arbitrar o acesso ao canal, com a finalidade de eliminar a colisão de dados na direção *upstream* e, ao mesmo tempo, compartilhar eficientemente a largura de banda entre todas as ONUs [37]. Também é necessária a implementação de esquemas para satisfazer requisitos de QoS, sendo essencial para dar suporte a vários tipos de tráfego [3], pois o *Ethernet*, intrinsecamente, não suporta QoS.

Em junho de 2004, o trabalho do grupo EFM 802.3ah foi aprovado pelo IEEE Std 802.3ah-2004 [38]. Este padrão especifica operações de administração para a subcamada MAC e uma família de especificações para a camada física. São consideradas fora do escopo deste grupo de trabalho algumas funcionalidades como alocação dinâmica e controle de largura de banda, processos de alarme, recuperação de falhas, alimentação e refrigeração [8], [20].

O padrão IEEE 802.3ah especificou o controle multiponto (*multipoint control protocol* - MPCP) de acesso ao meio na topologia P2PM [38], que será abordado na subseção a seguir.

3.4.1 Protocolo MPCP

O MPCP é um protocolo que especifica mecanismos para a OAM [18]. Fornece uma infra-estrutura de sinalização para coordenar a transmissão de dados entre as ONUs e o OLT, conectadas a um segmento P2MP, para permitir uma eficiente transmissão de dados. Este protocolo não inclui nenhum algoritmo particular de alocação de largura de banda, assim como nenhum esquema de programação intra-ONU. Em vez disso, o MPCP é um mecanismo de suporte para facilitar a implementação de vários algoritmos [14], [37], [38].

O MPCP executa uma função na subcamada MAC [8], [24]. Cada ONU incorpora uma instância do protocolo MPCP que se comunica com aquela do OLT. As mensagens de controle especificadas pelo MPCP são: *gate*, *report*, *REGISTER_REQ* (*request*), *REGISTER* e *REGISTER_ACK* (*acknowledge*). A emulação de topologia P2P para a transmissão *upstream* é realizada em conformidade com o padrão IEEE 802.1[17]. A Figura 3.5 mostra como o protocolo MPCP interage com o algoritmo DBA. Uma vez que o OLT recebe as informações e o requisito de largura de banda da ONU para a próxima transmissão, estes dados serão passados para o módulo DBA, que determina o *timeslot* e o tempo de início da transmissão

[39]. Depois, o OLT atualizará suas variáveis e estruturas de dados e programará a transmissão da mensagem *gate*.

Figura 3.5 - Bloco de gerenciamento no OLT.

3.4.1.1 Mensagens de Controle

O MPCP utiliza dois modos de operação: normal e autodescoberta [3], [37]. A operação em modo normal utiliza duas mensagens de controle *gate* e *report* para a transmissão *upstream*. A mensagem *gate* é utilizada pelo OLT para alocar dinamicamente largura de banda para cada ONU. A técnica de alocação está baseada no esquema TDM variável, alocando um número de *timeslots* contínuos às ONUs, baseado em sua solicitação ou SLA [17]. A mensagem *report* é utilizada pela ONU para reportar ao OLT sua condição local, como o total de bytes aguardando na fila para a transmissão. Para a operação em modo autodescoberta, o protocolo utiliza três mensagens de controle: *REGISTER*, *REGISTER_REQUEST* e *REGISTER_ACK*. Estas mensagens são utilizadas para verificar se uma ONU está ativa, detectar e registrar uma nova ONU conectada ou negociar parâmetros. O formato das mensagens *gate* e *report* é mostrado na Figura 3.6 e Figura 3.7, respectivamente. Esse formato adiciona novos campos de informação ao formato do quadro *Ethernet*,

aproveitando os espaços no cabeçalho e no campo de dados. Utilizam-se 3 *bytes* no cabeçalho para os campos de identificação de enlace lógico (*logical link identification* - LLID) e verificação de redundância cíclica (*cyclic redundancy check* - CRC). No campo *tipo* as mensagens de controle são especificadas do tipo 88-08. No campo de dados são definidos novos campos denominados *opcode*, *timestamp* e outros, que dependem do tipo de mensagem. O LLID é utilizado para a identificação da ONU, o CRC para detecção de erros, o *opcode* para indicar o tipo da mensagem de controle e o *timestamp* para sincronização. Além destes campos, a mensagem *gate* contém outros campos como tipo de permissão (*gate type* - GT), que é “0” em caso de operação normal ou “1” se é autodescoberta; número de permissões, podendo ser no máximo quatro; nível da permissão, que poderá ser de prioridade baixa (*low priority* - LP), prioridade média (*medium priority* - MP) e prioridade alta (*high priority* - HP); tempo de início da transmissão e comprimento da permissão [17]. A mensagem *report* também adiciona outros campos: número de filas existentes na ONU, suportando a informação de no máximo oito filas; prioridade da fila e comprimento da fila [17].

2 bytes	LLID	
1 bytes	CRC	
6 bytes	Endereço destino	
6 bytes	Endereço origem	
2 bytes	Tipo (0x8808)	
2 bytes	Opcode (0x0003)	
4 bytes	Timestamp	
1 bytes	GT	Número de permissões
1 bytes	Nível de permissão	
4 bytes	Tempo de começo da transmissão	
2 bytes	Comprimento da permissão	
	Campos opcionais	
4 bytes	FCS	
Quadro de 64 bytes		
GT: 0 = normal, 1 = autodescoberta		
Nível da permissão: 0 = LP, 1 = MP, 2 = HP		

N vezes

Figura 3.6 - Mensagens *gate*.

2 bytes	LLID
1 bytes	CRC
6 bytes	Endereço destino
6 bytes	Endereço origem
2 bytes	Tipo (0x8808)
2 bytes	Opcode (0x0003)
4 bytes	Timestamp
1 bytes	Número de filas
1 bytes	Nível da fila
2 bytes	Comprimento da fila
	Campos opcionais
4 bytes	FCS
Quadro de 64 bytes	

N vezes

Figura 3.7 - Mensagem *report*.

As mensagens *gate* e *report* utilizam o campo de *timestamp* para a sincronização, fator importante para o sucesso do esquema. A seguir são explicados como o MPCP opera utilizando estas mensagens de controle.

3.4.1.2 Operação do MPCP

Vários processos são realizados com a finalidade de coordenar a transmissão de dados entre o OLT e as ONUs. Conforme mostrado na Figura 3.8, para começar a transmissão na ONU o OLT terá que enviar uma mensagem *gate* com as permissões e o instante que a ONU deverá começar a transmissão. Quando a ONU recebe esta mensagem atualiza seus campos do instante de início e duração da transmissão e fixa seu relógio com o *timestamp* incluído na mensagem *gate*. O relógio então avança utilizando o oscilador local da ONU. Quando o relógio local da ONU atinge o instante de início da transmissão, a ONU começará a transmitir no intervalo de tempo estabelecido. A ONU pode organizar os quadros em várias filas priorizadas. A transmissão pode incluir múltiplos quadros *Ethernet*. Não é permitida a fragmentação de quadros na transmissão e, portanto, se os quadros não podem ser transmitidos no *timeslot* atual, serão adiados para o próximo. Um *timeslot* pode ser atribuído imediatamente, conforme solicitado, ou pode ser reservado com antecedência. Por razões de eficiência, qualquer *timeslot* reservado que não estiver sendo utilizado em sua totalidade pode ser redistribuído a outras ONUs, aumentando a eficiência da rede. A mensagem *report* é enviada pela ONU no início ou no fim do *timeslot* atribuído, junto com os quadros de dados [21]. Se a ONU dá suporte a serviços diferenciados, ela pode ter um conjunto de filas priorizadas para a transmissão e, portanto, reportará o estado de cada uma das filas de prioridade [17]. Conseqüentemente, o OLT também poderá enviar múltiplas permissões para as diferentes prioridades na mesma mensagem *gate*. Para solicitar um *timeslot* a ONU deve considerar a sobrecarga causada pelo preâmbulo do quadro e o intervalo que devem manter entre eles. Uma vez que a mensagem *report* é recebida pelo OLT, ela é passada para o módulo

DBA, que é responsável pela decisão de alocar largura de banda. Adicionalmente, o OLT recalculará o RTT da ONU utilizando a informação do *timestamp*. Este processo é mostrado na Figura 3.9. O RTT experimenta pequenos desvios com respeito à medida anterior, em razão da variação do índice de refração da fibra, resultante das alterações de temperatura. Um desvio grande do RTT alertará ao OLT da possível perda de sincronização da ONU, a qual não obterá uma permissão até que seja reiniciada (sincronizada novamente). O módulo DBA deverá programar a permissão para a ONU de tal forma que a informação desta chegue ao OLT imediatamente depois da ONU anterior programada, mantendo somente um pequeno intervalo de tempo entre ambas as transmissões, chamado tempo de guarda. A ordem de transmissão de informação das ONUs é feita em forma cíclica, denominando-se **ciclo de interrogação** ao intervalo de tempo em que todas as ONUs terão transmitido uma vez ao OLT.

Figura 3.8 - Fluxo das mensagens *gate* e *report* [37].

1. OLT envia *gate* no tempo T1.
2. ONU recebe *gate* e atualiza seu relógio com T1.
3. ONU envia *report* quando o relógio atinge o tempo T2.
4. OLT recebe *report* em T3.
5. OLT calcula $RTT = (T3 - T1) - (T2 - T1)$.

Figura 3.9 - Cálculo do RTT no OLT para uma determinada ONU.

O capítulo seguinte se concentra no estudo de algoritmos DBA baseados em MPCP.

CAPÍTULO 4 Alocação de Largura de Banda

A alocação de largura de banda é um processo realizado no OLT, que tem por objetivo gerenciar as transmissões realizadas das ONUs ao OLT, já que elas compartilham o canal de comunicação. O gerenciamento deve fazer uma eficiente utilização do canal, aproveitando ao máximo a capacidade do enlace. Na EPON a alocação de largura de banda está baseada no esquema TDMA e, portanto, o OLT alocará intervalos de tempo (*timeslot*) para cada ONU, com a finalidade de efetuar sua transmissão livre de colisão. Esse procedimento demanda que as tarefas sejam realizadas sincronizadamente. Por último, deve dar suporte a vários serviços como VoIP (voz sobre IP), SDTV, HDTV, videoconferência e dados, constituindo-se em parte crítica do projeto da rede EPON [14]. A alocação pode ser realizada em forma centralizada, no OLT; compartilhada, distribuindo funcionalidades entre o OLT e a ONU; ou descentralizada, apenas nas ONUs.

O desempenho de uma rede baseada em pacotes pode ser convenientemente caracterizado por vários parâmetros como a largura de banda, o atraso de quadro (latência), a variação do atraso (*jitter*) e a probabilidade de perda de quadros. A QoS numa rede refere-se à habilidade de estabelecer limites de operação em alguns ou em todos aqueles parâmetros para uma determinada conexão [22], de acordo com o tipo de tráfego transportado. Porém, não são todos os tipos de redes que podem manter um controle sob cada conexão ou até mesmo identificar o tipo de tráfego que está sendo transmitido, como é o caso do padrão *Ethernet*. O suporte a serviços com QoS é um fator fundamental em redes EPON, considerado no projeto da subcamada MAC.

Muitos esquemas de alocação de largura de banda baseados em TDM foram apresentados na literatura [16], [17], [20], [21]. Os sistemas baseados em TDM atendem os usuários tipicamente em forma cíclica [17], efetuando uma complexa sincronização.

Em [16], os autores propuseram um esquema de alocação de largura de banda que estabelece *timeslots* fixos para a transmissão, sendo a implementação simples. Porém, em algumas situações, o *timeslot* atribuído pode ser insuficiente para cobrir os requisitos de largura de banda da ONU, devido às características do tráfego em rajada, até mesmo para cargas baixas. Este fato aumenta o atraso do quadro, aguardando vários *timeslot* até serem transmitidos. Em outras situações, alguns *timeslots* podem ser subutilizados, mesmo sob carga alta. Conseqüentemente, este esquema implica em grande desperdício de largura de banda.

O objetivo dos algoritmos é combinar de maneira eficiente os sistemas TDM com uma programação dinâmica. Assim, foram propostos os algoritmos de alocação dinâmica de banda (*dynamic bandwidth allocation* - DBA) que utilizam a multiplexação estatística¹⁰ [23], [40], [41]. Estes algoritmos reduzem o tamanho do *timeslot* quando não há dados a transmitir, disponibilizando o restante para outras ONUs. Portanto, esses algoritmos se mostram mais eficientes, otimizando a largura de banda do canal. O desafio para a implementação dos algoritmos DBA era saber a quantidade de *bytes* que estavam aguardando para a transmissão em cada ONU. Desse modo, foram propostos esquemas de interrogação, nos quais as ONUs informam o tamanho das suas filas para o OLT alocar o *timeslot*. Esses esquemas são implementados para que as ONUs possam aproveitar ao máximo a capacidade do canal, sem desperdiçar significativamente a largura de banda no processo de envio de mensagens de controle, seja do OLT às ONUs ou das ONUs ao OLT.

Posteriormente, foram propostos algoritmos DBA que oferecem suporte a QoS [17], [18], [21], [22], [42]. O desafio destes algoritmos era incorporar a programação por prioridades e outras tarefas aos algoritmos DBA para atender às classes de tráfego [17], [30],

¹⁰ A multiplexação estatística aloca largura de banda unicamente aos elementos da rede que estejam ativos, aproveitando melhor a capacidade do canal.

[32]-[39], [43]. Assim, foram propostos vários algoritmos que definem novas tarefas tanto na ONU quanto no OLT.

Neste capítulo são apresentados e analisados os algoritmos mais importantes propostos para EPON.

4.1 Algoritmos DBA

O algoritmo de alocação dinâmica de largura de banda, utilizado no *módulo DBA* do protocolo de transmissão MPCP, descrito na seção anterior, estabelece o *timeslot* que será atribuído a uma determinada ONU de acordo com seu pedido.

4.1.1 Tarefas do DBA

O algoritmo DBA programa o início e a duração de cada transmissão, assim como também estabelece um limite à largura de banda que será atribuída à ONU para evitar a monopolização do canal. Também estabelece uma política de interrogação, que determina a forma como o OLT obterá as informações dos requisitos de largura de banda das ONUs. Por último, define um esquema para determinar a ordem em que se efetuará a programação das transmissões das ONUs.

4.1.1.1 Limitação da Largura de Banda [20]

O algoritmo DBA pode alocar *timeslot* fixos, com base no SLA, ou variáveis, com base na carga média da rede. Em condições de carga alta, o tamanho máximo do *timeslot* determinará a duração máxima do ciclo de interrogação. Em geral, se o ciclo de interrogação é muito longo, então o atraso do quadro na fila será maior para uma carga alta. Por outro lado, se o ciclo de interrogação for muito curto, resultará em maior desperdício de largura de banda, em razão dos intervalos entre os quadros e os tempos de guarda entre transmissões

consecutivas. Considerando todos estes fatores, o tamanho de *timeslot* máximo atribuído para a transmissão tem grande impacto no desempenho do sistema, o qual determina a largura de banda mínima garantida para cada ONU. A largura de banda atribuída a uma determinada ONU pode ser limitada somente se todas as ONUs estiverem utilizando toda sua largura de banda disponível. Se uma ONU utiliza uma largura de banda menor, o tempo do ciclo é menor, colocando à disposição maior largura de banda para as outras ONUs.

Existem vários esquemas que limitam ou mantêm um controle sob a largura de banda a ser atribuída a uma determinada ONU:

1. **Serviço fixo:** este esquema ignora o *timeslot* requerido e sempre concede a uma ONU um tamanho fixo de *timeslot* em cada ciclo. Este esquema opera exatamente como o TDM, na qual o *timeslot* de cada ONU é fixo e é ignorada a taxa de chegada de tráfego atual. Como resultado, o ciclo de interrogação é constante. Este esquema é eficiente para sistemas EPON que transportam principalmente tráfego CBR [44]. Porém, para o tráfego em rajada, este esquema apresenta um grande desperdício de largura de banda, em razão de muitos *timeslot* não estarem sendo utilizados em sua totalidade. Muitos quadros ficam aguardando nas filas enquanto o canal *upstream* está sendo subutilizado, o que aumenta o atraso dos quadros.
2. **Serviço limitado:** Este esquema atribui o *timeslot* solicitado, mas este não deve exceder um valor máximo permitido. No mecanismo de envio das mensagens *report* e *gate*, cada ONU experimenta um intervalo de espera desde o instante do envio da mensagem *report* até o instante da recepção da mensagem *gate* (instante da transmissão). Este esquema não inclui na permissão os quadros que chegam no intervalo de espera à ONU, sendo adiados para a transmissão até o próximo ciclo, mesmo se o canal *upstream* experimenta tráfego leve. O resultado é o aumento de atraso do quadro.

3. **Serviço de crédito:** Este serviço constitui uma solução para diminuir o atraso experimentado pelos quadros utilizando o esquema limitado. A alocação de largura de banda com base em crédito considera na permissão os quadros que chegam à ONU no intervalo de espera, alocando a largura de banda solicitada acrescida de um crédito. Este crédito pode ser constante ou proporcional ao pedido. O crédito constante é atribuído sem considerar o tamanho do *timeslot* solicitado e a ONU efetua a transmissão tentando usufruir o crédito. O tamanho constante do crédito influencia no desempenho da rede. Se ele for muito pequeno, não melhorará significativamente o atraso do pacote; se for muito grande, reduzirá a utilização de largura de banda do canal *upstream*. Por outro lado, o esquema linear de crédito determina o crédito a ser atribuído de acordo com o tamanho do pedido. Este esquema se baseia no grau de previsibilidade que usualmente o tráfego da rede exhibe. Isso significa que se uma rajada grande de dados é observada, então será muito provável que essa continue por um longo período de tempo.

4. **Serviço elástico:** Este esquema não tem limitações de tamanho máximo de *timeslot* e a única limitação é o tempo máximo do ciclo de interrogação. O *timeslot* máximo atribuído a uma ONU será mudado dinamicamente com base no tamanho acumulado das N últimas permissões e garantindo que elas não excedam N vezes o tamanho máximo de *timeslot*, sendo N o número de ONUs. Portanto, se apenas uma ONU possui dados para a transmissão, então esta pode obter um tamanho de *timeslot* N vezes o tamanho máximo do *timeslot*. Este esquema tenta aproveitar a largura de banda que não está sendo utilizada pelas ONUs que apresentam cargas leves.

Todos estes tipos de serviços foram avaliados em [20], onde é ressaltado que o serviço limitado apresenta melhor desempenho em termos do atraso do quadro e processamento,

compartilhando eficientemente a largura de banda e garantindo equidade entre todas as ONUs.

4.1.1.2 Utilização do Canal

Uma vez que as ONUs compartilham o canal da fibra tronco, é preciso fazer uma boa administração dele. A forma como é efetuada a interrogação das ONUs influenciará a utilização do canal. Várias políticas foram detalhadas na literatura e são brevemente comentadas a seguir.

Uma política simples é a chamada *poll-and-stop* [37], mostrada na Figura 4.1a, na qual o OLT envia uma mensagem *gate* a uma ONU e só poderá enviar outra mensagem *gate* à ONU seguinte se a ONU atual terminou sua transmissão e enviou seu novo pedido. Esta política de interrogação desperdiça excessivamente a largura de banda entre as transmissões.

Outra política que se mostrou mais eficiente é a política denominada **interrogação intercalada**. Este esquema envia a permissão a uma determinada ONU e enviará a permissão para a ONU seguinte antes que a ONU atual tenha terminado sua transmissão (ver Figura 4.1b). Este procedimento é possível porque os canais *upstream* e *downstream* são separados. Além disso, o OLT mantém uma tabela de interrogação¹¹ com a informação de cada ONU, permitindo ao OLT saber exatamente o instante que chegará o último *bit* da transmissão de uma determinada ONU. Portanto, o sincronismo do sistema é mantido. Desta forma, o OLT sabe o instante para enviar a mensagem *gate* para a ONU seguinte, de tal forma que o primeiro bit dela chegue imediatamente depois do último bit da ONU que estava transmitindo, sendo preciso manter somente o tempo de guarda entre as transmissões. O tempo de guarda fornece proteção para possíveis flutuações do RTT e do tempo de processamento das mensagens de controle e, adicionalmente, para que o receptor do OLT possa ajustar sua

¹¹ Tabela implementada e mantida pelo OLT com as informações de cada ONU como o pedido e o tempo de ida e volta, utilizadas para a programação das transmissões.

sensibilidade em razão das ONUs estarem localizadas a distâncias diferentes. Os resultados obtidos em [20] mostram que a **interrogação intercalada** melhora significativamente a utilização do canal e diminui o atraso médio de quadro.

Outro esquema, chamado **interrogação intercalada com parada** [17], opera da mesma forma que o esquema anterior. Porém, ao final de cada ciclo, o esquema determina efetivamente os *timeslots* a serem alocados às ONUs com base na informação reunida no ciclo atual. Portanto, o OLT não enviará a mensagem *gate* à primeira ONU no ciclo seguinte sem que antes tenha recebido as transmissões de todas as ONUs interrogadas no ciclo atual (ver Figura 4.1c). Esta política permite ao OLT alocar *timeslot* de maneira mais eficiente, com base na informação de todo o ciclo de interrogação, alocando a largura de banda não utilizada por algumas ONUs às ONUs com tráfego intenso. Porém, o canal não será utilizado por um período de tempo ao final de cada ciclo de interrogação, diminuindo a utilização do canal.

Figura 4.1 - Políticas de interrogação: a) *poll-and-stop*, b) intercalado, c) intercalada com parada [37].

4.1.1.3 Programação das Transmissões

O OLT estabelece a ordem em que as ONUs efetuarão a transmissão, o que influencia também o desempenho da rede. O esquema *round robin*¹² (RR) é o mais utilizado em algoritmos de interrogação [20], [21], [43]. O RR programa a transmissão das ONUs em forma cíclica na mesma ordem em que estão indexadas na tabela de interrogação. Porém, este

¹² Método para selecionar todos os elementos de um grupo de maneira mais equitativa, normalmente começando pelo primeiro elemento da lista até chegar ao último e recomeçando pelo primeiro.

esquema não considera a carga atual de cada ONU, podendo haver ONUs que estejam experimentando tráfego intenso e requeiram prioridade na transmissão.

Os algoritmos adaptativos alocam dinamicamente a ordem de transmissão das ONUs, considerando as condições instantâneas de tráfego de cada uma. Por exemplo, um algoritmo adaptativo com base no tamanho da fila programa a transmissão das ONUs em forma descendente, transmitindo em primeiro lugar aquela que apresente a fila mais longa (*longest queue first* - LQF) [37]. Outro tipo de algoritmo adaptativo é o que se baseia no tempo de chegada do primeiro pacote em cada fila, sendo programada em ordem ascendente, transmitindo em primeiro lugar aquela na qual o primeiro pacote chegou mais cedo (*earliest packet first* - EPF). Em situações de tráfego médio o esquema EPF se mostrou mais eficiente que o esquema RR, reduzindo os atrasos médio e máximo de quadro [40].

4.2 Tipos de Algoritmos DBA

Os algoritmos DBA para EPONs são classificados em dois grupos: os algoritmos que inicialmente incluíram a multiplexação estatística e os algoritmos que posteriormente incluíram, além da multiplexação estatística, o suporte a QoS [14]. A seguir, são comentados os principais algoritmos para EPONs propostos na literatura [17], [18], [20]-[23].

4.2.1 Métodos de Multiplexação Estatística

Em [20] foi proposto o algoritmo interrogação intercalada com ciclos de tempos adaptativos (*interleaved polling with adaptive cycle time* – IPACT), que atribui os *timeslots* às ONUs segundo a informação do tamanho da fila no *buffer*. Este algoritmo utiliza a **interrogação intercalada** para programar as transmissões das ONUs, sendo interrogada a ONU seguinte antes do término da transmissão atual. Ele utiliza o esquema RR, atendendo

cada ONU uma vez por ciclo. Os tempos de ciclo de interrogação são adaptativos (variáveis) porque os *timeslots* atribuídos às ONUs dependem das solicitações de largura de banda. Este esquema utiliza o *serviço limitado*, evitando desta forma a monopolização do canal. O IPACT trabalha com um formato particular para as mensagens de controle que são inseridas no quadro *Ethernet* junto com a informação que está sendo enviada. Desta forma evita-se utilizar um quadro *Ethernet* inteiro como especificado no MPCP para as mensagens de controle. Portanto, este esquema reduz a sobrecarga gerada pela sinalização¹³, melhorando a utilização do canal. Outra característica importante deste esquema é que as ONUs não necessitam estar sincronizadas, pois o algoritmo DBA está implementado integralmente no OLT, realizando todo o sincronismo do sistema. Esta característica facilita a atualização do algoritmo frente a qualquer condição do sistema, tendo que alterar somente o algoritmo no OLT [14].

Posteriormente, em [23] os autores propuseram uma extensão do algoritmo IPACT denominado *control theoretic extension of IPACT*. Este esquema estima a quantidade de tráfego que chegará a uma ONU entre duas solicitações sucessivas, adicionando esta estimação (crédito) ao *timeslot* que será alocado à ONU. Especificamente, a ONU envia a mensagem *report* com a variável R_i , que contém a diferença entre o *timeslot* atribuído e o tamanho da fila atual. Esta variável expressará a quantidade de tráfego adicional que chegou à ONU no intervalo de espera. Será zero caso não seja verificado nenhum tráfego adicional e um valor negativo, caso contrário. Posteriormente, esta variável é utilizada pelo OLT para o cálculo do *timeslot* seguinte, de acordo com:

$$Q_i(n+1) = Q_i(n) - \mathcal{R}_i(n) \quad (4.1)$$

na qual $Q_i(n)$ é o tamanho do *timeslot* atribuído à ONU i no ciclo n ;

¹³ A sinalização se refere ao processo de envio de mensagens de controle entre as ONUs e o OLT.

$R_i(n) = Q_i(n) - [q_i(n-1) + \lambda_i(n-1)]$; $q_i(n)$ é o comprimento da fila na ONU i no ciclo n ;
 $\lambda_i(n)$ é o tamanho acumulado dos quadros que chegaram à ONU i durante o ciclo $(n, n+1)$;
 γ é o fator de ganho.

O OLT aloca a largura de banda com base no tamanho da permissão prévia mais um fator γ multiplicando a diferença R_i informada pela ONU, sendo o sistema assintoticamente estável para $0 < \gamma < 2$. Essencialmente, este algoritmo é um sistema de controle automático para alocação de largura de banda cujo objetivo é manter a diferença $R_i(n)$ próxima de zero. A vantagem desta abordagem é que o tamanho do *timeslot* se aproxima tipicamente daquele necessário no instante da transmissão na ONU experimentando, conseqüentemente, menor perda e atraso de quadros. Uma desvantagem deste esquema é que o sistema de controle pode requerer um ajuste cuidadoso para alcançar uma resposta rápida se o tráfego é mudado sem criar oscilações no sistema. Isto pode ser um inconveniente se o tráfego é altamente variável.

A seguir serão tratadas as técnicas propostas para dar suporte a QoS.

4.2.2 Suporte a Qualidade de Serviço

A QoS é necessária para dar suporte a serviços em tempo real como voz e vídeo, sendo aplicada em qualquer rede que apresente uma propensão para congestionamento e atraso de informação sensível.

Podem ser citadas três características básicas da transmissão que são fundamentais para a QoS [34]:

1. Atraso (*latência*): é o intervalo de tempo transcorrido para a informação chegar, desde o nó origem até o nó destino. Para um dispositivo como um comutador ou roteador, o atraso é o intervalo de tempo que uma mensagem aguarda desde sua chegada até o

instante de ser transmitido, isto é, o intervalo de tempo gasto pelo dispositivo para processar a mensagem e enviá-la.

2. Variação do atraso (*Jitter*): é a flutuação do atraso entre a transmissão e a recepção. Os intervalos entre as chegadas dos quadros são variáveis, diferentes dos intervalos com os que foram transmitidos. O *jitter* causa instabilidade na qualidade do sinal de vídeo.
3. Taxa de transmissão: quantidade de bits transmitidos por unidade de tempo.
4. Perda de quadros: ocorre quando um dispositivo não pode dar suporte ao tráfego experimentado e descarta quadros.

Para suportar requisitos das diversas aplicações, a rede deve tratar de forma diferenciada cada uma delas, classificando o tráfego em um número limitado de classes. Estas redes são conhecidas por redes que suportam classes de serviço (*classes of service* - CoS) [22]. A rede EPON está habilitada para suportar diferentes tipos de tráfego [6]. Para suportar todas estas aplicações, os algoritmos DBA devem ser combinados com outras operações, como a programação por prioridade e gerenciamento de filas. Foram propostos vários mecanismos de CoS para EPON, que incluem programação intra-ONU e programação inter-ONU [22], conforme ilustra a Figura 4.2. Os mecanismos para a programação intra-ONU devem ser realizados em conformidade com o padrão IEEE 802.1D, que define o *bridging* (programação intra-ONU) e as CoS [22].

Figura 4.2 - Programação inter-ONU e intra-ONU [22].

Na subseção seguinte detalhamos o padrão IEEE 802.1D utilizado para a programação intra-ONU.

4.2.2.1 Padrão IEEE 802.1D

Para suportar CoS, o padrão *Ethernet* deve classificar o tráfego e oferecer um tratamento diferente a cada uma das classes. Isto pode ser implementado mediante a extensão de dois novos padrões: P802.1p “suplemento às *bridges* do MAC que enviam classes de tráfego e filtram *multicast* dinâmico” e P802.1Q “*bridged* de redes locais virtuais” [22]. Este último padrão define uma extensão aos pacotes *Ethernet*, que permite inserir informação de QoS dentro de um quadro *Ethernet* [37]. Em 802.1p/Q, três bits são alocados para especificar a prioridade do quadro. Estes três bits são parte do identificador VLAN. O padrão IEEE 802.1D distingue as seguintes classes de tráfego [4], [19], [22], [34]:

1. Controle de Rede: É a informação necessária para manutenção, controle e suporte da infra-estrutura de rede, sendo caracterizado pela frase *must get there*. Se as aplicações

de controle de rede não estiverem operando apropriadamente, o desempenho das aplicações dos usuários finais pode ser prejudicado;

2. Voz: Este tipo de tráfego em tempo real é caracterizado por requerer menos de 10 ms de atraso de pacote;
3. Vídeo: O vídeo está caracterizado por requerer menos de 100 ms de atraso de pacote;
4. Controle do tráfego: Importantes aplicações de uma companhia como sistemas de informação que precisam de atualização em operação, as que estão sujeitas a alguma forma de “controle de admissão”. Este é estabelecido com pré-planejamento dos requisitos de rede;
5. Excelente esforço (*excellent effort*): Determina um limite de tempo aceitável para que a informação esteja disponível no destino. Por exemplo, podem ser citadas aplicações de e-mail e transferência de arquivos, com prioridade empresarial. Assim, se um e-mail enviado de um usuário a outro leva alguns minutos para alcançar o destino, isso é perfeitamente aceitável. No entanto, num ambiente empresarial, esse tempo pode não ser tolerado;
6. Melhor esforço: É o tráfego apresentado pelas redes LAN até hoje. A LAN oferece um mesmo nível de serviço para todos os tipos de tráfego, seguindo o esquema primeiro a chegar, primeiro a sair (*first in first out* - FIFO) para o atendimento;
7. Background: Transferência em volumes (serviços de transferência de arquivos) e outras atividades que são permitidas na rede, mas que não devem afetar o desempenho da rede em outras aplicações.

Se a infra-estrutura da rede trabalha com um número menor de classes de serviço, estas podem ser agrupadas. Por exemplo, se a rede distingue apenas uma classe de tráfego, então todas as classes são agrupadas e atendidas igualmente. Por outro lado, se a rede distingue duas classes de tráfego, as classes de controle de rede, voz, vídeo e controle de carga podem ser agrupados numa primeira classe só e as classes de excelente esforço, melhor esforço e background numa segunda classe, e assim sucessivamente, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Mapeamento das classes de tráfego dentro de filas de prioridade (P802.1)

Classes de tráfego	Enfileiramento dos Tipos de Tráfego						
1	Controle Rede	Voz	Vídeo	Controle Carga	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Background
2	Controle Rede	Voz	Vídeo	Controle Carga	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Background
3	Controle Rede	Voz	Vídeo	Controle Carga	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Background
4	Controle Rede	Voz	Vídeo	Controle Carga	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Background
5	Controle Rede	Voz	Vídeo	Controle Carga	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Background
6	Controle Rede	Voz	Vídeo	Controle Carga	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Background
7	Controle Rede	Voz	Vídeo	Controle Carga	Excelente Esforço	Melhor Esforço	Background

A especificação P802.1D estabelece que o comportamento padrão *per-hop* (*per-hop behavior* - PHB) das *bridgest* do MAC, especificado na cláusula 7.7.4, é uma **programação estrita de prioridade**. Esta programação seleciona num instante os quadros de uma determinada fila de prioridade para a transmissão, sempre que as filas de maior prioridade

estejam vazias. A maneira como os quadros de uma determinada fila serão selecionados é especificada na cláusula 7.7.3 [22].

4.2.2.2 Enfileiramento prioritário

Uma forma eficiente e simples de dar suporte a diferentes níveis de QoS é utilizar enfileiramento prioritário nas ONUs [21]. O enfileiramento prioritário classifica o tráfego que chega à ONU e que, posteriormente, será armazenado na respectiva fila de prioridade, conforme mostra a Figura 4.3.

O gerenciamento de fila é efetuado pela ONU adotando uma política simples: se um quadro de prioridade alta chega à ONU e encontra o *buffer* cheio, então se descartam os quadros necessários da fila de prioridade mais baixa para liberar espaço no *buffer*; mas, se um pacote de prioridade baixa encontra o *buffer* cheio, ele será descartado. Este tipo de procedimento penaliza o tráfego de prioridade baixa, que experimentará uma alta perda de quadros, podendo ser totalmente descartado por causa do esgotamento de recursos. Como resultado, o sistema aumentará o nível de parcialidade (ilimitado crescimento do atraso de pacotes, excessiva perda de quadros para alguns tipos de tráfego) e um dos motivos é a falta de controle para os tráfegos de prioridades altas. Para solucionar este problema, a ONU deve implementar algum tipo de política de tráfego para controlar a quantidade de tráfego de prioridade alta de cada usuário.

Figura 4.3 - Enfileiramento prioritário e programação intra-ONU.

A política de tráfego monitora o tráfego, sendo empregada para verificar se determinado tráfego obedece a um perfil previamente estabelecido no SLA. Caso contrário, várias ações podem ser tomadas, entre elas:

- a. Formatação do tráfego (*traffic shaping*): esta técnica altera o padrão do tráfego, suavizando rajadas por meio de uma separação temporal mais uniforme dos instantes de envio dos quadros, para que a taxa instantânea não seja consideravelmente mais alta que a taxa média de transmissão;
- b. Marcação dos pacotes fora de conformidade: para serem descartados à frente caso seja verificado uma situação de congestionamento;
- c. Descarte de pacotes.

4.2.2.3 Programação por Prioridade

Uma vez que a ONU insira os quadros nas filas com nível de prioridade correspondente, eles serão transmitidos até o OLT utilizando uma política de programação por prioridade. Esta política determinará que quadros e de quais filas serão transmitidos no *timeslot* atribuído. A programação por prioridade pode ser efetuada na ONU (programação intra-ONU) ou pode ser delegada ao OLT [21].

O protocolo MPCP fornece uma estrutura para dar suporte à programação por prioridade. Dispõe vários campos nas mensagens *report* e *gate* que permitem adicionar informações dos estados das filas e das permissões para cada fila de prioridade, respectivamente. A programação é realizada pelo OLT, oferecendo desta forma um controle centralizado e prescindindo da programação intra-ONU. Este procedimento pode permitir uma melhor decisão de alocação de largura de banda por classes. Porém, a complexidade do OLT aumentará. O MPCP também não especifica um algoritmo de alocação considerando classes de serviço, permitindo que o algoritmo seja desenvolvido pelos fornecedores [21].

Nas subseções seguintes descreveremos como estes problemas são abordados e as soluções propostas.

4.2.3 Algoritmos com Garantia de QoS

Nesta seção é descrito como esquemas DBA podem ser combinados com programação por prioridades e enfileiramento prioritário com a finalidade de estabelecer uma rede EPON que dê suporte a serviços diferenciados.

Em [22], os autores propuseram um algoritmo, com base no IPACT, estendido para múltiplas classes de serviço. Diferentemente do IPACT, este esquema se baseia no protocolo MPCP proposto em IEEE 802.3ah e define três tipos de tráfego: alta, média e baixa prioridade. O algoritmo utiliza uma combinação de serviço limitado (programação inter-ONU) com a programação por prioridade. As ONUs são encarregadas de efetuar o enfileiramento e a programação por prioridade (programação intra-ONU). Para a programação por prioridade, primeiramente utilizam a **programação estrita de prioridade**, especificado em IEEE 802.1D, notando uma característica interessante no desempenho do sistema, que foi denominado **penalidade de carga-leve** (*light-load penalty*). Na qual, alguns tipos de tráfego experimentam um maior atraso de quadro com a diminuição da carga, isto é, porque os quadros de prioridades altas sempre são priorizados para a transmissão antes que os de prioridades baixas. Desta forma, é violada a imparcialidade que o sistema deveria apresentar, já que esta penalidade afeta só alguns tipos de tráfego. Para solucionar este problema, os autores propuseram dois métodos chamados *buffer* de duas etapas (*two-stage buffer*) e crédito CBR. No primeiro método, a ONU envia sua solicitação no tempo t_{report} , informando o tamanho das suas filas. Posteriormente, o OLT enviará a respectiva permissão e a ONU começará a transmissão no instante indicado, transmitindo unicamente os quadros que chegaram antes do t_{report} , utilizando a **programação estrita de prioridade**. Este método

elimina completamente a **penalidade de carga-leve**, porém o atraso dos pacotes de prioridade alta é aumentado. Para diminuir este atraso, o segundo método proposto, crédito CBR, estima a quantidade de tráfego de prioridade alta que chega à ONU no período entre o envio da solicitação (t_{report}) e o começo da transmissão. Então, o OLT adiciona ao *timeslot* a estimativa obtida. Este último esquema reduz o atraso experimentado pelo tráfego de prioridade alta e soluciona parcialmente a **penalidade de carga-leve**, porém requer constante verificação externa dos processos de chegada de pacotes de prioridade alta para a sua predição.

Posteriormente, em [17], os autores divulgaram um algoritmo de alocação de largura de banda para serviços multimídia sobre EPON, com base no MPCP. O esquema utiliza a **programação estrita de prioridade**, classificando o serviço também em três categorias de prioridade: alta, média e baixa. O algoritmo utiliza a **interrogação intercalada com parada** para efetuar a alocação de largura de banda. A programação por prioridade é efetuada no OLT, demandando que as ONUs tenham que reportar a ocupação de cada fila de prioridade e o OLT terá que enviar múltiplas permissões para cada ONU por ciclo. O relatório de tamanho de fila e OAM são efetuados como serviços de prioridade alta. O OLT aloca uma largura de banda fixa para o tráfego de prioridade alta, incluindo a largura de banda adicional para o relatório do tamanho de fila e o OAM. O remanescente de largura de banda da classe alta é distribuído à classe média, sempre que o total dos seus pedidos seja menor ou igual ao remanescente. Caso contrário, será distribuído equitativamente entre todas as ONUs. Do mesmo modo, a largura de banda restante das classes alta e média é distribuída entre todos os pedidos da classe baixa. A desvantagem desta política é a alocação de largura de banda fixa para a classe de prioridade alta, que penaliza as classes de prioridade média e baixa [18]. Neste esquema, os autores não apresentaram os resultados das simulações para mostrar o desempenho deste algoritmo que combina DBA com a **programação estrita de prioridade**.

Em [21] foi proposto outro algoritmo DBA com suporte a QoS. Este esquema efetua na ONU (programação intra-ONU) a programação por prioridade e o enfileiramento prioritário, estabelecendo três prioridades de filas: alta, média e baixa. Este algoritmo utiliza uma política para realizar o enfileiramento prioritário na ONU, com a finalidade de evitar que o tráfego de prioridade baixa experimente uma excessiva perda de quadros ou esgotamento de recursos. A política controlará a quantidade de tráfego que cada usuário tem permissão de enviar [39], podendo gerar só um tráfego equivalente ao seu SLA, descartando o tráfego adicional. Porém, sempre será descartada uma quantidade maior de pacotes de prioridade baixa em comparação aos de prioridade alta. Entretanto, é garantido que o tráfego de prioridade alta não ultrapassará seu SLA. Este algoritmo incorpora uma metodologia de programação por prioridade similar ao crédito CBR proposto em [22], na qual também é estimada a quantidade de tráfego de prioridade alta que chega à fila da ONU no período de espera. O OLT atende as solicitações utilizando a **interrogação intercalada com parada** para o envio das mensagens de controle. Porém, é enviada uma mensagem *gate* à ONU imediatamente depois de ter recebido a mensagem *report*, sempre que a solicitação de largura de banda seja menor que um valor mínimo de largura de banda garantido B_i . Por outro lado, os pedidos das ONUs de carga elevada, cuja solicitação de largura de banda é maior que B_i , serão adiados até que todas as mensagens *report* sejam recebidas. O remanescente da largura de banda disponível de cada ONU é acumulado e redistribuído às ONUs de carga elevada. Esta distribuição é realizada de acordo com o peso de cada ONU, determinado segundo o seu SLA. Este algoritmo diminui o atraso experimentado em cada ciclo utilizando a **interrogação intercalada com parada** (envio das *gates* depois de ter recebido todas as *request*), mediante o envio das mensagens *gates* para as ONUs de carga leve imediatamente depois de ter recebido a mensagem *report*. Portanto, este esquema mostra melhor desempenho em termos de atrasos médio e máximo de pacote. A desvantagem desta abordagem é que a ordem em que

são atendidas as ONUs em cada ciclo de interrogação varia, sendo atendidas primeiro as ONUs de carga leve e depois as ONUs de carga elevada. Assim, a estimação que é realizada para determinar o crédito que será atribuído a cada ONU é severamente prejudicada, já que o tempo de espera para cada ONU pode mudar de maneira drástica.

Em [18] foi proposto o algoritmo chamado alocação de largura de banda com múltiplos serviços (*dynamic bandwidth allocation with multiple services* - DBAM). O DBAM utiliza o **serviço limitado** para controlar a alocação de largura de banda. As ONUs efetuam uma estimação da quantidade de tráfego, de cada tipo, que chegará desde os usuários no intervalo de espera que experimentam até receber sua permissão, e as adicionam ao pedido que será enviado ao OLT. Esta estimação é obtida de acordo com o pedido do intervalo anterior (R_{i-1}) mais um fator α multiplicando R_{i-1} . O intervalo é definido como o período de tempo entre dois envios consecutivos das mensagens *reports*. O fator α é a razão entre o tempo de espera e o intervalo. O OLT atende as ONUs seguindo o esquema *round robin*, com a finalidade de simplificar a estimação do tráfego. Este esquema determina uma largura de banda máxima para cada tipo de tráfego, de acordo com seu SLA. O OLT atende primeiro as classes de prioridade alta e média, que necessitam de largura de banda garantida, porém considerando sempre o tamanho máximo de largura de banda para cada classe. A classe de prioridade baixa é atendida com a largura de banda não utilizada das classes superiores. Este algoritmo diminui o atraso médio do quadro e a perda de quadros em comparação com os esquemas de alocação apresentados até agora neste trabalho.

A Tabela 4.2 mostra um resumo das principais características dos algoritmos mais representativos, listado em ordem crescente de desempenho.

Tabela 4.2 - Resumo das principais características de vários mecanismos em esquemas DBA para QoS.

Algoritmo	Tipo de Serviço	Utilização do canal	Programação das transmissões	Programação por prioridade	Enfileiramento
IPACT para QoS	Limitado.	Interrogação intercalada.	round robin.	Programação estrita de prioridade num intervalo de tempo na ONU / estimação do tráfego de prioridade alta.	Simples ¹⁴ .
DBA multimídia.	Limitado.	Interrogação intercalada com parada.	round robin.	Programação estrita de prioridade no nível da PON. Atende todos os pedidos da classe alta, e com o remanescente a seguinte classe.	Simples.
DBA para QoS	Serviço elástico.	Interrogação intercalada com semiparada, as ONUs de cargas leves são atendidas imediatamente.	Ordem de atendimento dos pedidos de acordo à carga. As ONUs com cargas $> B_i$ são atendidas no final.	Programação estrita de prioridade num intervalo de tempo na ONU / estimação do tráfego de prioridade alta.	Política de filas, limitadas pelo SLA.
DBAM	Limitado.	Interrogação intercalada.	Round robin.	Estimação para cada tipo de tráfego na ONU. Programação estrita de prioridade no nível da PON, atendendo primeiro a classe alta e média, limitando-as pelo seu SLA e, com o remanescente de largura de banda, atende a classe baixa.	Simples.

¹⁴ Simples, refere-se à política básica de enfileiramento prioritário: se o buffer está cheio e chegam quadros, se eles forem de prioridade alta a ONU liberará espaço no buffer descartando os quadros necessários de prioridades menores. Por outro lado, se eles forem de prioridade baixa, serão descartados.

4.2.4 Algoritmos DBA Descentralizados

Os padrões especificados pelo grupo IEEE 802.3ah EFM estabelecem uma estrutura centralizada [14], [16]. Este plano de controle centralizado é efetuado pelo OLT, tanto para a transmissão *upstream* quando *downstream*, uma vez que o OLT tem conhecimento global sobre o estado da rede. Até aqui, todos os esquemas de alocação de largura de banda mencionados efetuam esta centralização de operação do sistema. Um dos maiores problemas associados com a arquitetura centralizada é o *single-point of failure problem*. Esta é uma situação na qual a falha do OLT não permitirá mais o funcionamento da EPON inteira. Existem estudos de esquemas descentralizados [42], nos quais o OLT é excluído de toda atribuição de *timeslot*. Neste caso, implementa-se um plano de controle distribuído, sem impor restrição à topologia da PON. Em primeiro lugar é necessária uma comunicação direta entre as ONUs, que pode ser realizada conectando duas portas de um combinador/divisor $3 \times N$ por meio de um isolador óptico. Neste esquema, as ONUs trocam informação de sinalização e controle referente ao estado de fila e à necessidade de transmissão entre elas. Em seguida, cada ONU executa simultânea e independentemente o algoritmo DBA, obtendo-se os mesmos resultados em todas as execuções. Posteriormente, a ONU autorizada transmite sua informação sem chance de colisão e, desta forma, o OLT é excluído do controle. Comparando com alguns esquemas centralizados, este apresenta igual eficiência [42]. Uma desvantagem é que necessita de mais um receptor nas ONUs que opere no comprimento de onda *upstream*, aumentando a complexidade da ONU e, conseqüentemente, o custo.

CAPÍTULO 5 Algoritmos DBA e Qualidade de Serviço

Neste capítulo são detalhadas algumas características de dois algoritmos de alocação de largura de banda que utilizam o esquema TDM e avalia-se o desempenho de cada um deles. Os autores em [20] propuseram o algoritmo IPACT. Este algoritmo é considerado uma proposta atraente para realizar a alocação dinâmica de largura de banda porque as ONUs não precisam estar sincronizadas e as mensagens de controle são intercaladas com os quadros de transmissão. Assim, o tráfego resultante do atraso na propagação do sinal é reduzido, aumentando a eficiência [3], [36], [43], [45]-[48]. Vários algoritmos de alocação de largura de banda são baseados no IPACT [23], [48], [49]. Desse modo, o IPACT será objeto de estudo neste capítulo e também sua extensão que integra o suporte várias classes de serviço [22]. Este último algoritmo pode ser considerado o precursor dos algoritmos DBA para QoS [14].

5.1 Caracterização do IPACT

O algoritmo IPACT é um esquema de alocação dinâmica de largura de banda proposto para a rede EPON. Este algoritmo integra a multiplexação estatística no processo de alocação de largura de banda, alocando o *timeslot* solicitado à ONU, de modo que ele não exceda o seu tamanho máximo permitido (**serviço limitado**). A largura de banda garantida para cada ONU é estabelecida de acordo com seu tamanho máximo de *timeslot* e este, por sua vez, pode ser estabelecido segundo o SLA. Os tempos do ciclo de interrogação são adaptativos, atendendo cada ONU apenas uma vez a cada ciclo. O IPACT envia uma permissão de transmissão para uma determinada ONU sem que a transmissão da ONU anterior tenha terminado. Esta programação é realizada para que duas transmissões consecutivas cheguem ao OLT mantendo

somente um intervalo de tempo mínimo entre elas (**interrogação intercalada**). A ordem das transmissões é efetuada seguindo o esquema *round robin* [20]. Todas as tarefas que fazem parte do gerenciamento e controle das transmissões estão concentradas no OLT, estabelecendo assim uma arquitetura centralizada. Uma tarefa importante realizada pelo OLT é a sincronização do sistema, necessária para efetuar transmissões livres de erros. As ONUs são desincumbidas dessa tarefa, contrariamente ao protocolo MPCP que especifica a ONU fazendo parte desta tarefa.

Por outro lado, cada ONU guarda a informação que chega num *buffer* de capacidade limitada, até que seja possível enviá-la no seu *timeslot*. Porém, se o *buffer* estiver no seu limite de armazenamento, os quadros que chegarem depois serão descartados. O gerenciamento da fila no *buffer* é realizado utilizando o esquema FIFO. Este esquema implementa a seguinte política: os pacotes que chegam primeiro serão atendidos também primeiro, ou seja, são atendidos mantendo a ordem de chegada.

O IPACT especifica um formato simples para as mensagens de controle, as quais são inseridas num quadro *Ethernet* junto com os dados. Evita-se, desta forma, a utilização de um quadro *Ethernet* completo para o envio das mensagens de controle (como é especificado normalmente no protocolo MPCP), conseqüentemente o tempo de sinalização é reduzido.

Uma desvantagem deste algoritmo é que não foi projetado para dar suporte a serviços sensíveis ao atraso e ao *jitter*, já que o algoritmo não faz distinção entre tráfegos que chegam à ONU nem estabelece classes de serviços. Portanto, este algoritmo não é recomendado para serviços que demandam QoS.

5.1.1 Mensagens de Controle

Para os autores de [20] o processamento das mensagens de controle, segundo especificado no protocolo MPCP, apresentava dois problemas. Primeiro, o envio das

mensagens de controle *report* demanda a utilização de largura de banda que se intensifica quando os tamanhos dos *timeslots* solicitados são pequenos. Isto gera aumento de tráfego, tanto *upstream* quanto *downstream*, consumindo mais recursos da rede. Segundo, o OLT atrasa o envio da mensagem *gate* (que contém a permissão) às ONUs, caso o tráfego *downstream* seja alto. Conseqüentemente, há um desperdício de largura de banda nesse intervalo. Com a finalidade de eliminar estes inconvenientes, os autores propuseram um novo formato de mensagens de controle. Este formato é constituído por três campos, o primeiro para o código de escape (1 *byte*), o segundo para a identificação da ONU (*node identification* – NID) (1 *byte*) e o terceiro WS para a solicitação da ONU em caso de mensagem *report*, ou para a permissão à ONU em caso da mensagem *gate* (2 *bytes*). Esta mensagem de controle é inserida num quadro *Ethernet*, como ilustrado na Figura 5.1. A mensagem *report* pode ser enviada ao final, no meio ou no começo da transmissão de uma ONU. O código de escape (ESC) utiliza um dos códigos livres de controle de 8 a 10 *bits* de *Ethernet* e é utilizado para a identificação da mensagem. Uma vez lido o código ESC, o receptor detecta o início da mensagem de controle e extrai seguidamente os 3 *bytes* da NID e do WS. Portanto, este esquema melhora a utilização do canal empregando apenas uma pequena fração daquele para o transporte das mensagens de controle.

byte A	byte B	byte C	ESC	NID	WS	byte D	byte E	byte F	byte G	byte H
--------	--------	--------	-----	-----	----	--------	--------	--------	--------	--------

Figura 5.1 - Quadro de controle inserido no quadro *Ethernet* [41].

5.1.2 Programação de Mensagem de Controle

O algoritmo IPACT programa o envio de mensagens *gate* com base na seguinte expressão:

$$G_j^{[i+1]} = \text{MAX} \begin{cases} G_j^{[i]} + r^{[i]} - r^{[i+1]} + \frac{W_j^{[i]}}{R_u} + B \\ G_{j-1}^{[i+1]} + r^{[i+1]} \end{cases} \quad (5.1)$$

na qual $G_j^{[i]}$ é o instante em que a j -ésima mensagem *gate* será transmitida à i -ésima ONU; $r^{[i]}$ é o RTT da i -ésima ONU; $W_j^{[i]}$ é o comprimento do j -ésimo *timeslot* para a i -ésima ONU; R_u é a taxa de transmissão da fibra que enlaça as ONUs com o OLT; B é o tempo de guarda.

Uma mensagem *gate* é enviada de forma sincronizada do OLT à ONU. Quando a mensagem chega à ONU é processada e a ONU começa imediatamente sua transmissão, a qual chega ao OLT depois do tempo de guarda da transmissão da ONU anterior.

Se a fila de uma determinada ONU está vazia, o OLT atribui um *timeslot* que permite unicamente transmitir a mensagem *report* com o pedido para o ciclo seguinte.

5.1.3 Partida a Frio (*cold start*)

No início da operação o OLT supõe que todas as ONUs estão desconectadas. Portanto, é necessário que o OLT primeiramente identifique e determine o tempo de ida e volta (RTT) a cada ONU, para o qual é utilizado o algoritmo proposto em [41]:

$$G_j^{[i+1]} = \text{MAX} \begin{cases} G_j^{[i]} + A^{[i]} - C^{[i+1]} + \frac{D_j^{[i]}}{S} + B \\ G_{j-1}^{[i+1]} + A^{[i+1]} \end{cases} \quad (5.2)$$

sendo,

$$A^i = \begin{cases} \text{TIMEOUT} , & \text{se } ONU^{[i]} \text{ está desligada} \\ r^{[i]} & , \text{ caso contrário} \end{cases}$$

$$C^{[i+1]} = \begin{cases} 0 & , \text{ se } ONU^{[i+1]} \text{ está desligada} \\ r^{[i+1]} & , \text{ caso contrário} \end{cases}$$

$$D_j^{[i]} = \begin{cases} 0 & , \text{ se } ONU^{[i]} \text{ está desligada} \\ W_j^{[i]} & , \text{ caso contrário} \end{cases}$$

Este algoritmo supõe que todas as ONUs estão localizadas na distância máxima permitida e é utilizado o valor máximo do RTT para todas elas. Desta forma, garante-se que a resposta enviada por uma determinada ONU estará livre de sofrer colisão.

5.2 Descrição do Modelo

Para a simulação é suposto que a EPON apresenta uma topologia em árvore, conforme mostrado na Figura 5.2. As ONUs estão localizadas a diferentes distâncias da central, variando no intervalo de 10 a 20 km. Admite-se que o tempo de ida (do OLT à ONU) é diferente do tempo de volta (da ONU ao OLT), já que os comprimentos de onda de operação *upstream* e *downstream* são diferentes, os quais são escolhidos aleatoriamente. Supõe-se também que a infra-estrutura utiliza para a conexão uma fibra óptica com índice de refração do núcleo 1,5. Conseqüentemente, um pulso óptico propagando-se nessa fibra percorrerá a distância de 1 km em 5 μ s. Portanto, o RTT para cada ONU varia aproximadamente de 100 a 200 μ s.

Figura 5.2 - Topologia da rede simulada com taxa de transferência R_u na fibra tronco e R_D até os usuários.

A Tabela 5.1 mostra outros parâmetros também empregados na simulação.

Tabela 5.1 - Parâmetros utilizados nas simulações.

Símbolo	Descrição	Valor
R_u	Taxa do canal da EPON	1000 Mbps
R_D	Taxa do canal (usuários-ONUs)	100 Mbps
N	Número total de ONUs	16
Q	Tamanho do buffer nas ONUs	10 MB
L	Distância máxima entre OLT e ONUs	20 km
W_{MAX}	Máximo tamanho do timeslot	15000 B
B	Tempo de guarda entre transmissões	5 μ s
T_{MAX}	Tempo máximo do ciclo de interrogação	2 ms

O tamanho máximo do *timeslot* $W_{MAX}^{[i]}$ para a i -ésima ONU é obtida em função do tempo máximo do ciclo de interrogação (2 ms), utilizando a seguinte expressão:

$$T_{MAX} = \sum_{i=1}^N \left(B + \frac{W_{MAX}^{[i]}}{R_u} \right) \quad (5.3)$$

Obtendo-se um tamanho máximo de *timeslot* de 15000 bytes, resulta numa taxa mínima garantida $\Lambda_{MIN}^{[i]}$ de 60 Mbps para cada ONU

$$\Lambda_{MIN}^{[i]} = \frac{W_{MAX}^{[i]}}{T_{MAX}} \quad (5.4)$$

Por sua vez, a taxa máxima garantida $\Lambda_{MAX}^{[i]}$ é de 600 Mbps para cada ONU, isto é considerando que apenas uma ONU tem informação para transmitir

$$\Lambda_{MAX}^{[i]} = \frac{W_{MAX}^{[i]}}{N \times B + \frac{W_{MAX}^{[i]}}{R_u}} \quad (5.5)$$

Em cada simulação foi processado um total de 10 milhões de quadros *Ethernet* na transmissão *upstream* [50]. O ciclo de interrogação e o tamanho do *timeslot* não são estabelecidos na especificação IEEE 802.3ah e os valores mencionados são exemplos típicos que dependem dos requisitos de largura de banda garantida [16], [21], [22], [41], [42].

5.3 Tráfego

Os algoritmos são submetidos a um tráfego convencional em rajadas, gerado para algumas simulações utilizando a distribuição de Poisson e, para outras, utilizando o tráfego auto-similar. No tráfego Poissoniano os intervalos entre as chegadas e a duração dos quadros seguem a distribuição exponencial. Este tráfego apresenta rajadas intensas, mas sem a dependência de cauda longa, denominado tráfego de dependência de cauda curta (*short-range dependence* - SRD) [4]. No tráfego auto-similar, para a geração das rajadas foi utilizada a distribuição de Pareto e para os intervalos entre as rajadas a distribuição exponencial. Este tráfego exibe as propriedades de auto-similaridade e de dependência de cauda-longa (*long-range dependence* – LRD), reproduzindo melhor o comportamento do tráfego em rajadas das redes LAN *Ethernet* [4], [20], [51]. Para gerar o tamanho dos quadros utilizou-se uma distribuição trimodal, similar àquela observada nas redes de longa distância e redes de acesso. Estes modos principais correspondem aos tamanhos de quadro mais freqüentes: 64 bytes (46%), 582/594 bytes (10%) e 1518 bytes (12%) [22].

5.3.1 Tráfego Poissoniano

No tráfego Poissoniano o número de ocorrências num intervalo de tempo fixo é dado pela distribuição de Poisson:

$$P(A(t) = n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (5.6)$$

na qual λ é o valor médio de ocorrências por unidade de tempo e n é o número de ocorrências até um instante t com uma determinada probabilidade.

O tempo entre as chegadas é exponencial com média $1/\lambda$ [33]. Portanto, os intervalos entre chegadas de quadros e a duração dos mesmos seguem a distribuição exponencial

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha x}, \quad x > 0, \alpha > 0 \quad (5.7)$$

sendo $1/\alpha$ a média e, portanto, $\alpha = \lambda$ (da distribuição de Poisson).

Para determinar uma variável aleatória x com distribuição exponencial pode-se utilizar uma variável aleatória de distribuição uniforme

$$x = -\frac{\ln u}{\lambda} \quad (5.8)$$

sendo u um número aleatório com distribuição uniforme entre $[0, 1]$.

5.3.2 Tráfego Auto-similar

Em [51] foi demonstrado estatisticamente que o tráfego em redes *Ethernet* LAN é auto-similar, ou seja, a duração de uma rajada está associada a distribuições estatísticas de cauda longa. Esta propriedade mostra que quanto maior o período de duração de uma rajada, maior é a probabilidade de ela continuar ativa. O tráfego auto-similar resulta da agregação de múltiplos fluxos, cada um consistindo de períodos alternados *ON/OFF* (os períodos *ON* correspondem às rajadas e os *OFF* aos intervalos entre as rajadas). Neste caso, utiliza-se a distribuição *bounded Pareto* para determinar a duração das rajadas (período *ON*), que formará no mínimo um quadro. A distribuição é dada por

$$f(y) = \alpha y^{-\alpha-1} \frac{k^\alpha}{1 - \left(\frac{k}{p}\right)}, \quad \alpha > 0, k \leq y \leq p \quad (5.9)$$

na qual k e p são, respectivamente, os valores mínimo e máximo, que podem ser atribuídos à variável y ; α é o parâmetro de forma da distribuição, exibindo auto-similaridade quando $0 < \alpha < 2$.

O parâmetro de Hurst indica o grau de auto-similaridade do tráfego e é dado por:

$$H = \frac{3-\alpha}{2} \quad (5.10)$$

Quando $0,5 < H \leq 1$, o tráfego é dito auto-similar. Se o valor de H é próximo de 1 indica que o tráfego exibe um alto grau de auto-similaridade. O parâmetro de forma $\alpha = 1,4$ é recomendado pelas medições de tráfego *Ethernet* [51], utilizado para gerar os períodos *ON*.

Finalmente, para gerar o número de quadros que chegarão numa rajada (y) da distribuição *bounded Pareto* utiliza-se a seguinte expressão:

$$y = \frac{k}{\left\{ 1 + u \left[\left(\frac{k}{p} \right)^\alpha - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (5.11)$$

na qual u é uma variável aleatória com distribuição uniforme entre $[0, 1]$.

Por outro lado, os intervalos de tempo entre as rajadas (período *OFF*) são gerados utilizando a distribuição exponencial [52].

5.4 Descrição do Programa

A análise dos processos que envolvem a rede EPON foi realizada utilizando a linguagem de modelagem unificada (*unified modeling language* - UML). A UML é uma linguagem de modelagem padrão especificada pelo grupo de gerenciamento de objeto (*object management group* - OMG), que ajuda a especificar os requisitos, visualizar, analisar, projetar e documentar modelos de sistemas de software. Esta linguagem não determina como deve ser feita cada etapa do projeto de software, mas sim fornece as ferramentas para explorar detalhadamente o problema.

O diagrama de classes é considerado uma das estruturas mais importantes da UML que descreve a estrutura do sistema, mostrando as classes que o compõem e como estão relacionadas entre elas. Cada classe está definida com seus atributos e as operações que realizam. A Figura 5.3 apresenta o diagrama de classes do modelo a simular.

O programa foi implementado utilizando a linguagem C++ orientada a objetos.

Figura 5.3 - Diagrama de classes.

O funcionamento da rede EPON foi simulado mediante a ocorrência de eventos no decorrer do tempo. Neste trabalho foram identificados os seguintes eventos para a simulação:

1. Chegada dos quadros às ONUs: é o processo de atendimento do tráfego enviado pelos usuários até às ONUs, armazenando os quadros nos *buffers* até que estes sejam enviados no seu *timeslot*;
2. Envio dos quadros ao OLT: ao receber a mensagem *gate*, a ONU imediatamente começa a enviar seus quadros até chegar ao limite do *timeslot*, agregando no final sua solicitação para o próximo ciclo;
3. Recepção da mensagem de solicitação das ONUs: uma vez recebida a mensagem *report* da ONU, o OLT determina o *timeslot* a alocar e programa o tempo de envio da permissão à ONU utilizando o algoritmo DBA;
4. Envio das permissões às ONUs: o OLT envia uma permissão à ONU no instante agendado. Desta maneira, começa o processo de sincronismo e o OLT sabe exatamente quando chega o primeiro *bit* da ONU.

As ONUs são representadas por meio de uma estrutura de dados de filas encadeadas circularmente, permitindo a simulação por meio do esquema *round robin*. Do mesmo modo, o *buffer* nas ONUs foi implementado por meio de filas encadeadas. Esta estrutura não estabelece um limite fixo para o número de quadros que possam ser armazenados. Porém, é controlado o tamanho acumulado de quadros em relação ao tamanho do *buffer*.

5.5 Resultados da simulação

É avaliado o desempenho do algoritmo IPACT por meio dos seguintes parâmetros: atraso médio do quadro, tamanho médio da fila, razão de quadros perdidos e tempo médio do ciclo de interrogação. Os resultados são obtidos para um nível de confiança de 95% e com 5 graus de liberdade. Este último significa que as médias alcançadas foram calculadas a partir de 6 resultados parciais (amostras).

Na simulação, o tráfego é idêntico em todas as ONUs, variando de 11 Mbps até 100 Mbps. Cabe ressaltar que, enquanto a carga total da rede for maior que a carga agregada das ONUs ($R_U \geq N \times R_D$), não haverá problema de utilização da taxa plena. Os tamanhos mínimo e máximo do quadro são fixados em 64 *bytes* e 1528 *bytes*, respectivamente. Os resultados obtidos são similares aos divulgados em [20].

A Figura 5.4 apresenta o atraso médio do quadro experimentado nas filas das ONUs. Neste gráfico pode-se observar que para cargas menores que 50% (50 Mbps) nas ONUs, os quadros experimentam atrasos menores entre 0,28 ms e 0,86 ms. Para cargas acima de 50% esta variação torna-se mais acentuada, de 0,86 ms a 1,34 s. Especificamente, quando as ONUs experimentam 50% do seu tráfego total, o sistema apresenta uma carga alta de 800 Mbps. A capacidade total do sistema (1 Gbps) é alcançada em aproximadamente 60% do tráfego de cada ONU, com um atraso de aproximadamente 1 s. Neste ponto, os tempos dos ciclos de interrogação são suficientemente longos para que cada ONU, nesse período, receba uma quantidade de *bytes* de dados maior que o *timeslot* máximo atribuído. Assim, o atraso nas filas para alguns quadros aumenta pelo menos um ciclo. Uma vez atingida a capacidade total do sistema, ocorre grande aumento no valor do atraso. Cabe ressaltar que o sistema foi projetado para garantir, a cada ONU, uma taxa mínima de 60 Mbps e, conseqüentemente, acima desta taxa, até 100 Mbps, os quadros apresentam um atraso maior que 1 s.

Figura 5.4 - Atraso médio do quadro versus carga oferecida pela ONU.

A Figura 5.5 apresenta o tamanho médio da fila que é similar ao gráfico do atraso médio dos quadros. Pode-se observar que, conforme a carga da rede nas ONUs aumenta, o tamanho das filas também aumenta. Porém, quando a carga da rede na ONU está entre 45% e 65%, o tamanho das filas aumenta rapidamente, alcançando seu tamanho máximo. Isto significa que o sistema atingiu seu desempenho máximo e, acima deste valor haverá perda de quadros.

Figura 5.5 - Tamanho médio da fila versus carga oferecida pela ONU.

A Figura 5.6 mostra a probabilidade de perda de quadro, definida como a razão entre os quadros perdidos e o número total de quadros gerados [18]. Quando a carga oferecida nas ONUs está em torno de 58% (58 Mbps), a carga total da rede está em aproximadamente 90%. Pode-se observar que a perda de quadros é zero ou insignificante se a carga total da rede é menor que 90%. Quando está em torno de 90%, observa-se uma perda de quadros de aproximadamente 0,8%. Neste ponto, os recursos do sistema estão exauridos, uma vez que a ONU aproxima-se da taxa garantida (60 Mbps). Logo, acima de 90% o sistema começa a descartar quadros aceleradamente porque os *buffers* das ONUs alcançam seu limite de armazenamento.

Figura 5.6 - Razão de quadros perdidos em função da carga oferecida na ONU.

A Figura 5.7 apresenta o tempo médio do ciclo de interrogação. Nas ONUs para cargas baixas (menor que 50 Mbps), os tempos do ciclo de interrogação são pequenos, refletindo que nenhuma ou apenas algumas das ONUs estão utilizando seu máximo *timeslot* permitido. Para cargas de rede acima dos 50 Mbps, o tempo do ciclo de interrogação experimenta um aumento acentuado, alcançando o máximo valor permitido (2 ms) com carga de 60 Mbps, a partir do qual o tempo se torna constante.

Figura 5.7 - Tempo médio do ciclo de interrogação em função da carga oferecida na ONU.

5.6 Algoritmo com QoS

Estes algoritmos combinam o esquema de alocação dinâmica de largura de banda com a programação por prioridade e o enfileiramento prioritário, os quais são adicionados às tarefas tanto da unidade de rede óptica (*optical network unit* - ONU) quanto do terminal de linha óptica (*optical line terminal* - OLT). Em [22] as técnicas de QoS foram integradas ao algoritmo IPACT, com base nos mecanismo de transmissão do protocolo MPCP. Este algoritmo mostrou várias características interessantes no processo da integração da programação por prioridade aos algoritmos DBA, verificadas nas simulações realizadas e abordados a seguir.

Ele emprega o esquema de **serviço limitado** para o atendimento no OLT (programação inter-ONU) e vários esquemas para a programação por prioridade na ONU (programação intra-ONU).

5.6.1 Enfileiramento prioritário

O tráfego das ONUs é classificado em três tipos: tráfego de prioridade alta, média e baixa. O tráfego de prioridade alta faz parte da classe de envio imediato (*expedited forwarding* - EF) que é sensível ao atraso e requer taxa garantida. O tráfego de prioridade média constitui a classe de envio assegurado (*assured forwarding* - AF) que não é tão sensível aos atrasos em comparação ao de prioridade alta, mas necessita de taxa garantida. Por último, o tráfego de prioridade baixa constitui a classe do melhor esforço (*best effort* - BE) que não é sensível ao atraso e também não requer taxa garantida. Os quadros pertencentes a cada uma destas classes são enfileirados na correspondente fila de prioridade da seguinte maneira: se um quadro de prioridade alta encontra o *buffer* cheio, a ONU deslocará os quadros de prioridade baixa. Entretanto, se um quadro de prioridade baixa encontra o *buffer* cheio, então o quadro será descartado. Todas as filas compartilham o mesmo *buffer*.

5.6.2 Modelagem de tráfego

O tráfego será modelado em três classes, da seguinte forma:

1. Classe alta: é utilizado para reproduzir um circuito em uma conexão de pacotes (*circuit-over-packet connection*). Este tráfego é CBR, com quadros de 24 bytes, gerados a cada 125 μ s. Com a inclusão dos cabeçalhos Ethernet e UDP/IP, o tamanho do quadro resulta em 70 bytes, sendo utilizada uma taxa de 4,48 Mbps.
2. Classe média: são as rajadas de vídeo com taxa de bits variável (*variable bit rate* - VBR). É possível experimentar perda de quadros neste tipo de tráfego quando o *buffer* inteiro é ocupado pelos pacotes de prioridade alta e média. Para sua simulação foi utilizado tráfego auto-similar.

3. Classe baixa: é utilizado para a transmissão de dados que não são gerados em tempo real. Para sua simulação foi utilizado tráfego auto-similar.

Na simulação a carga nas ONUs é variada desde 5 Mbps até 100 Mbps. Os tráfegos de prioridade média e baixa experimentam uma carga de

$$R_T = (R_{atual} - 4Mbps) / 2 \quad (5.12)$$

na qual R_{atual} é o tráfego experimentado na ONU num determinado instante.

5.6.3 Programação por Prioridade e Resultados

Inicialmente é utilizada a **programação estrita de prioridade** definida no padrão IEEE 802.1D. Neste procedimento, os quadros de prioridade baixa serão transmitidos unicamente se as filas de prioridade média e alta estiverem vazias. Os resultados de simulação do sistema são apresentados na Figura 5.8. Pode-se observar que o sistema mantém um controle sobre o atraso máximo que o tráfego de prioridade alta pode experimentar, garantido desta forma a estabilidade do sistema. Igualmente, o atraso máximo experimentado pelo tráfego de prioridade media é 3 ms. Por outro lado, se observa que o tráfego de prioridade baixa, que apresenta a mesma taxa que o tráfego de prioridade média, experimenta um atraso maior, de até 2,1 s. A razão é que o tráfego de prioridade média é sempre atendido antes que o tráfego de prioridade baixa. Este último é atendido unicamente com o restante da largura de banda atribuída. Entretanto, quando o tráfego diminui de uma carga moderada de 0,25% para 0,05%, o atraso do tráfego de prioridade baixa aumenta significativamente de 1,8 ms para 34,4 ms, respectivamente, apresentando maiores atrasos para menores cargas. Esta característica é denominada **penalidade de carga-leve** [22], na qual o sistema incrementa a parcialidade em cargas baixas da rede, sendo o tráfego de prioridade baixa mais afetado.

Figura 5.8 - Atraso médio do quadro para cada uma das prioridades versus a carga na ONU.

Isto é ocasionado pela mensagem informando o tamanho da fila (solicitação) que é realizado no instante do envio da mensagem *report*, t_{report} . Depois de um intervalo de tempo (intervalo de espera) é permitida a transmissão (mensagem *gate*) à ONU. Nesse intervalo de espera chegam vários quadros de prioridade alta e, conseqüentemente, são priorizados para a transmissão. Os quadros de prioridade baixa citados no t_{report} serão enviados na próxima transmissão. Assim, o atraso do tráfego de prioridade baixa aumenta. Este fato é exacerbado sob cargas leves, porque o tráfego de prioridade alta apresenta uma carga constante e, sobre cargas leves, este tráfego se constitui preponderante, deslocando os de prioridades baixas durante a transmissão.

Uma solução para este problema é utilizar o método **buffer de duas etapas**, na qual o sistema restringe a **programação estrita de prioridade** unicamente aos quadros que chegaram em um determinado intervalo de tempo. Especificamente, a ONU envia sua solicitação ao OLT no tempo t_{report} , considerando todos os quadros que chegaram até esse instante. Em seguida, a ONU armazena esses quadros nas filas da segunda etapa do *buffer* e, posteriormente, serão transmitidos no começo do *timeslot*, seguindo o esquema FIFO. Os

quadros que chegaram depois do t_{report} são armazenados na primeira etapa do *buffer*, nas respectivas filas de prioridade e poderão ser transmitidos no *timeslot* atual sempre que houver largura de banda sobrando. Portanto, os quadros de prioridade alta que chegaram depois do t_{report} serão transmitidos no seguinte *timeslot*. Isso limita o atraso experimentado pelo tráfego de prioridade baixa, como pode ser observado na Figura 5.9. A **penalidade de carga-leve** foi eliminada, mas o atraso dos quadros de prioridade alta experimentou um aumento de 0,9 ms, no esquema anterior, para 2,8 ms, aproximadamente, duas vezes o seu valor. Isso ocorre porque os quadros que não estão sendo incluídos no *timeslot* terão que aguardar mais um ciclo para serem transmitidos.

Figura 5.9 - Atraso médio do quadro para o tráfego de prioridade alta (EF), média (AF) e baixa (BE), utilizando o esquema *buffer de segunda fase*.

Uma solução para diminuir o atraso experimentado pelos quadros de prioridade alta é utilizar o esquema chamado crédito CBR [22]. Como o tráfego de prioridade alta é CBR e sendo conhecido seu comportamento, o OLT poderá estimar facilmente os quadros que chegaram no intervalo de espera e incrementar o tamanho do *timeslot* pela quantidade dessa estimativa. A Figura 5.10 apresenta os resultados desta simulação. Pode-se observar que o

aumento experimentado pelo atraso do tráfego de prioridade alta, utilizando o método de **buffer de duas etapas**, foi diminuído [22]. O atraso máximo experimentado pelo tráfego de prioridade alta é 1 ms. O tráfego de prioridade média alcança um atraso máximo de aproximadamente 4 ms para uma taxa de 48 Mbps. Por outro lado, o atraso do tráfego de prioridade baixa na faixa de transmissão de 27 Mbps a 33 Mbps experimenta um aumento significativo no atraso, de 1 ms a 0,3 s.

Figura 5.10 - Atraso médio do quadro para o tráfego de prioridade alta (EF), média (AF) e baixa (BE), utilizando o esquema *crédito CBR*.

No capítulo seguinte será estudado como as técnicas de multiplexação em comprimento de onda são integradas aos esquemas de multiplexação no tempo, com a finalidade de aumentar a disponibilidade de largura de banda das redes EPON. Estes esquemas são denominados algoritmos de alocação dinâmica de largura de banda e comprimento de onda (*dynamic-wavelength and bandwidth-allocation algorithms* - DWBAs).

CAPÍTULO 6 Algoritmos DWBA

O grupo de trabalho IEEE 802.3ah *Ethernet* na primeira milha especificou as redes EPON para operar com uma taxa de 1 Gbps suportando de 16 a 32 assinantes. Por conseguinte, cada ONU poderá dispor de largura de banda entre 30 Mbps e 60 Mbps. Em face do aumento do número de usuários e dos serviços banda larga, inevitavelmente, a largura de banda terá que ser ampliada.

Uma alternativa para ampliação da largura de banda é a utilização da técnica WDM [53], [54]. Entretanto, a implementação de rede de acesso com ONUs que operam apenas com essa técnica pode ser de alto custo, mesmo considerando todas as suas vantagens. Para superar essa dificuldade, foram propostos algoritmos que permitem a migração do cenário TDM para o WDM. Estes algoritmos são esquemas híbridos denominados DWBA, que tentam otimizar a multiplexação estatística intercanal e intracanal, com a finalidade de melhorar o desempenho [46].

Os autores em [49] e [55] propuseram integrar novos campos de informação às mensagens de controle do MPCP que permita à EPON operar com arquiteturas arbitrárias tanto no OLT quanto nas ONUs. Apresentaram os resultados das simulações utilizando uma técnica DWBA, denominada WDM IPACT, operando as ONUs em uma configuração mínima de dois comprimentos de onda. Segundo este esquema, algumas ONUs da EPON, que opera em TDM (EPON TDM), podem ser atualizadas para operar em WDM, mantendo a mesma taxa de *bits* em cada canal, tanto para a transmissão *upstream* quanto para a *downstream*. A atualização de todas as ONUs operando com WDM resulta em um sistema WDM PON.

Neste capítulo relata-se a simulação de uma arquitetura EPON TDM/WDM utilizando um algoritmo modificado do algoritmo WDM IPACT proposto em [49]. Esse algoritmo, que denominamos DWBA IPACT, faz uma extensão ao WDM IPACT, permitindo operar uma

EPON TDM com algumas ONUs atualizadas para WDM. Especificamente, algumas ONUs operarão com apenas um comprimento de onda, utilizando o esquema TDM, e outras em vários comprimentos de onda, utilizando TDM e WDM. Neste sentido, simula-se a EPON constituída por três grupos de ONUs: (1) ONUs que operam em esquema TDM com um único comprimento de onda (não-WDM); (2) ONUs implementadas com um conjunto de transceptores fixos (WDM); (3) ONUs com transceptores sintonizáveis (WDM). Os dois últimos grupos são de ONUs atualizadas para realizar o acesso múltiplo WDM. Posteriormente, o suporte a diferentes classes de serviço ao algoritmo DWBA IPACT é integrado. Utiliza-se um esquema otimizado do algoritmo de suporte a diferentes classes especificado em IEEE 802.1D, proposto em [22], denominado crédito CBR, simulado no Capítulo 5. É avaliado o desempenho do algoritmo DWBA IPACT, operando com os três tipos de ONUs, primeiro atendendo somente um tipo de tráfego e, posteriormente, atendendo tráfego diferenciado.

6.1 Extensão WDM para o MPCP

Em [49] e [55] foi proposta uma extensão para o protocolo MPCP que permite a atualização da EPON, que utiliza o esquema TDM, para uma arquitetura empregando WDM. As ONUs não-WDM podem ser atualizadas para operar em WDM, apresentando arquiteturas arbitrárias. Desta forma, o sistema apresenta flexibilidade para os processos de atualização.

A arquitetura WDM da EPON pode ser implementada da seguinte forma: (1) O OLT está constituído com um conjunto de receptores e lasers fixos; (2) As ONUs, igualmente, podem estar equipadas com um conjunto de receptores e lasers fixos ou por receptores e lasers sintonizáveis. Este esquema não restringe a arquitetura do OLT e das ONUs, podendo ser arbitrárias. As extensões realizadas ao MPCP permitirão ao OLT programar as transmissões em qualquer canal de comprimento de onda, tanto para a transmissão *upstream* quanto para a

downstream, suportado pelo OLT e a respectiva ONU. Para manter a compatibilidade, os processos de autodescoberta e registro das ONUs são efetuados no canal de comprimento de onda original da EPON TDM. Durante o processo de registro, as ONUs comunicam a seguinte informação acerca de sua arquitetura ao OLT:

Tipo_TX e tipo_RX: campos com 2 bits, indicando cada um o tipo de transmissor e receptor, respectivamente, apresentando a seguinte atribuição de valores: 0 = não-WDM, 1 = sintonização fixa, 2 = sintonizável e 3 = reservado;

Tempo_sintonização_TX e tempo_sintonização_RX: campos com 16 bits, cada um indica o tempo de sintonização do transmissor e o receptor, respectivamente, como um inteiro múltiplo da unidade de tempo, tal como microssegundos (se *tipo_TX* e *tipo_RX* é 2);

Tipo_id_comprimentoOnda: utiliza um bit para indicar o esquema de codificação dos comprimentos de onda suportados, utilizando a seguinte atribuição de valores: 0 indica o esquema de codificação hierárquica de dois níveis (identificador de *waveband* e mapa de bits para os comprimentos de onda suportados entre o *waveband*); 1 indica o esquema de codificação de bandeiras (mapa de bits dos comprimentos de ondas suportados);

Waveband_TX e waveband_RX: são 4 bits, cada um indicando o identificador do *waveband* suportado pelo transmissor e pelo receptor, respectivamente. O *waveband* é definido de acordo com o espaçamento do canal WDM especificado em ITU-T G.694.1 (se *tipo_id_comprimentoOnda* = 0);

ComprimentosOnda_suportados_TX e comprimentosOnda_suportados_RX: 16 bits (*tipo_id_comprimentoOnda* = 0) ou 128 bits (*tipo_id_comprimentoOnda* = 1) indicando o mapa de bits dos comprimentos de onda suportados pelo transmissor e o receptor, respectivamente.

Esta informação é mapeada dentro dos campos reservados da unidade de dados (*protocol data unit* - PDU) do REGISTER_REQ do protocolo MPCP, mostrado na Figura 6.1.

2 bytes	LLID	
1 byte	CRC	
6 bytes	Endereço destino	
6 bytes	Endereço origem	
2 bytes	Tipo (0x8808)	
2 bytes	Opcode (0x0004)	
4 bytes	Timestamp	
1 byte	Flags	
1 byte	Permissão pendente	
0/1 bytes	waveband_RX	waveband_TX
0/2 bytes	tempo_sintonização_RX	
2/16 bytes	comprimentoOnda_suportados_RX	
0/2 bytes	tempo_sintonização_TX	
2/16 bytes	comprimentoOnda_suportados_TX	
1/34 bytes	Reservado	
4 bytes	FCS	

Campos de bits	
0	Tipo_id_comprimento de onda
1	Registrador
2	Reservado
3	<i>Deregister</i>
4-5	Tipo_RX
6-7	Tipo_TX

(a) PDU MPCP REGISTER_REQ.

2 bytes	LLID	
1 byte	CRC	
6 bytes	Endereço destino	
6 bytes	Endereço origem	
2 bytes	Tipo (0x8808)	
2 bytes	Opcode (0x0002)	
4 bytes	Timestamp	
1 bytes	GT	Número de permissões
0/4 bytes	Grant # 1 Tempo de começo da permissão	
0/2 bytes	Grant # 1 Comprimento da permissão	
0/2 bytes	Tempo de sincronização	
0/1 byte	Grant # 1 comprimento de onda	
9-39 bytes	Campos opcionais	
4 bytes	FCS	
Quadro de 64 bytes		
GT: 0 = normal, 1 = autodescoberta		

N vezes

--> N vezes

(b) PDU MPCP *gate*.

2 bytes	LLID	Campos de bits		
1 byte	CRC			
6 bytes	Endereço destino			
6 bytes	Endereço origem			
2 bytes	Tipo (0x8808)			
2 bytes	Opcode (0x0007)			
4 bytes	Timestamp	<div></div>	0	Tipo_id_comprimentoOnda
1 byte	Flags		1-7	Reservado
2/16 bytes	ComprimentoOnda_recepção			
23/37 bytes	Reservado			
4 bytes	FCS			

(c) PDU MPCP RX_CONFIG.

Figura 6.1 – Proposta de extensão WDM aos PDUs do protocolo MPCP: (a) REGISTER_REQ;

(b) GATE; (c) RX_CONFIG.

O OLT aloca um determinado canal de comprimento de onda para a transmissão *upstream* a uma determinada ONU utilizando o campo *identificador de comprimento de onda*

de 8 bit (permitindo suportar até 256 comprimentos de onda únicos) na mensagem *gate*, como mostra a Figura 6.1b.

Para que o OLT possa realizar a reconfiguração do comprimento de onda de recepção de uma determinada ONU, os autores em [54] propuseram duas novas PDUs do MPCP: RX_CONFIG (Opcode = 00-07) e RX_CONFIG_ACK (Opcode = 00-08). O OLT envia a PDU RX_CONFIG para configurar de novo o receptor de uma determinada ONU. Esta PDU pode ser observada na Figura 6.1c.

6.2 Algoritmo DWBA IPACT

O algoritmo proposto em [49] é adaptado para que o sistema possa atender as ONUs não-WDM. O IPACT realiza a programação das transmissões em forma cíclica (RR). Então, em vez de aguardar que uma ONU complete sua transmissão *upstream* para poder receber a transmissão seguinte de outra ONU, o OLT poderá atender a transmissão seguinte utilizando outro comprimento de onda. Este algoritmo realiza um processo de alocação tentando sempre utilizar o menor número possível de comprimentos de onda, alocando somente aqueles que sejam necessários para atender o tráfego experimentado pela rede. Portanto, um comprimento de onda pode ser alocado para as ONUs WDM se satisfaz à condição:

$$t_{\lambda i} \leq t_{atual} + RTT + B_{ONU} + t_s \quad (6.1)$$

na qual, $t_{\lambda i}$ é o instante em que o λi será liberado; t_{atual} é o tempo atual; RTT é o intervalo de ida e volta até a uma ONU determinada; B_{ONU} é o **tempo de guarda** que a ONU precisa para efetuar o processamento e t_s é o intervalo necessário para a sintonização do transmissor. As ONUs não-WDM são atendidas no respectivo comprimento de onda de operação. O diagrama de fluxo deste algoritmo é mostrado na Figura 6.2.

Figura 6.2 - Diagrama de fluxo do algoritmo que determina o comprimento de onda ótimo para alocar numa determinada ONU (integrado ao IPACT).

Para efetuar esta programação o OLT deve atualizar constantemente o instante em que cada comprimento de onda será desocupado. Isto será possível, já que o OLT conhece exatamente quando começa e termina a transmissão de cada ONU. Portanto, para determinar exatamente quando um canal será liberado é utilizada a expressão:

$$t_{\lambda i} = t_i^j + RTT_v + \frac{W_j}{R_u} + B \quad (6.2)$$

na qual $t_{\lambda i}$ é o instante em que será liberado o comprimento de onda i ; t_i^j é o instante em que começa a transmissão da ONU j no comprimento de onda i ; RTT_v é o intervalo de tempo de volta do sinal, da ONU ao OLT; W_j é o *timeslot* atribuído à ONU j ; R_u é a taxa do

enlace das ONUs até o OLT; B é o tempo de guarda em que o OLT se preparará para receber a próxima transmissão.

A Figura 6.3 mostra um exemplo de uma rede EPON operando com dois comprimentos de onda e quatro ONUs, duas operando em todos os comprimentos de onda suportados no sistema (ONU3 e ONU4) e as outras duas (ONU1 e ONU2) operando apenas em um comprimento de onda (λ_1). É empregada a **interrogação intercalada** para o envio das mensagens de controle em cada canal.

- a. No início, todos os canais estão livres e o OLT envia a permissão G1 à ONU1 para que realize sua transmissão, utilizando o comprimento de onda 1.
- b. Posteriormente, como o canal 2 está livre, enviará a permissão G2 para a ONU3 que realizará sua transmissão paralelamente à transmissão da ONU1, utilizando o comprimento de onda 2.
- c. Depois, enviará a permissão G3 para a ONU2 para que realize sua transmissão no seu comprimento de onda de operação (λ_1), cuja transmissão chegará ao OLT imediatamente depois do término da transmissão da ONU1.
- d. Finalmente, o OLT envia a permissão G4 para que a ONU4 realize sua transmissão no comprimento de onda 2, o qual é desocupado primeiro, realizando sua transmissão paralelamente à ONU2, e assim por diante.

No final de cada transmissão cada ONU adiciona seu pedido de largura de banda para o próximo ciclo.

Figura 6.3 - Interrogação intercalada operando com dois comprimentos de onda e as ONUs dando suporte a classes de serviço.

6.3 Algoritmo DWBA IPACT Estendido para Classes de Serviço

O esquema DWBA IPACT é integrado às técnicas de suporte a classes de serviços utilizando o método crédito CBR [22]. O OLT inclui nos *timeslots* atribuídos um crédito para o tráfego de prioridade alta, pois este tipo de tráfego é mais sensível ao atraso.

O tráfego será modelado segundo o descrito na Seção 5.6.2 do Capítulo 5. Na simulação, as ONUs WDM apresentam o dobro do tráfego, de prioridades média e baixa, que as ONUs não-WDM.

A programação por prioridade e o enfileiramento prioritário são realizados nas ONUs (programação intra-ONU). O fluxo de dados desses algoritmos pode ser observado na Figura 6.4 e Figura 6.5. O esquema DWBA IPACT é implementado no OLT (programação inter-ONU).

Figura 6.4 - Diagrama de fluxo da programação das transmissões efetuada na ONU.

Figura 6.5 - Diagrama de fluxo do processo de enfileiramento realizado na ONU.

6.4 Resultados

Para a simulação foram utilizados os parâmetros mostrados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Parâmetros de simulação

Símbolo	Descrição	Valor
R_u	Taxa do canal da EPON	1 Gbps
R_D	Taxa do canal (usuários-ONUs)	100 Mbps-300 Mbps
N	Número total de ONUs	16/32
O_{WDM}	Número de ONUs WDM	8/16
p	Número de classes de prioridade	3
Q	Tamanho do buffer nas ONUs	10 MB
L	Distância máxima entre OLT e ONUs	20 km
W_{MAX}	Máximo tamanho do timeslot	15000 B
B	Tempo de guarda entre transmissões	5 μ s
T_{MAX}	Tempo máximo do ciclo de interrogação	2 ms
t_s	Tempo de sintonização do transmissor	5 μ s
t_g	Tempo de guarda nas ONUs	5 μ s

O número de comprimentos de onda de operação é variado para cada simulação, permitindo analisar o desempenho do sistema cada vez que é adicionado um novo comprimento de onda para operação.

6.4.1 Esquema DWBA IPACT

Para a simulação consideramos que o sistema é composto por 16 ou 32 (N) ONUs, das quais a metade é não-WDM e as restantes, WDM. As ONUs WDM operam em todos os comprimentos de onda suportados pela rede e são submetidas ao dobro do tráfego das ONUs não-WDM. Quando o sistema está operando com único comprimento de onda, consideramos que todas as ONUs são não-WDM. Cada comprimento de onda opera em taxa de transmissão de 1 Gbps. O tráfego gerado é do tipo Poissoniano, assim o tamanho do quadro e os intervalos entre as chegadas seguem distribuição exponencial. Os resultados da simulação são mostrados em forma de atraso médio do quadro em função da carga total do sistema. Esta carga total (Gbps) é o resultado da soma de todas as cargas experimentadas pelas ONUs.

A Figura 6.6 apresenta os resultados para a simulação de um sistema com total de 16 ONUs, das quais 8 são não-WDM e as restantes WDM. A carga das ONUs não-WDM é

variada de 10 Mbps até 120 Mbps e as ONUs WDM de 20 Mbps até 240 Mbps. Pode-se observar que, conforme o número de comprimentos de onda de operação é aumentado, o atraso do quadro diminui significativamente. Porém, quando o sistema está operando com 4 comprimentos de onda o atraso diminui ligeiramente. Isto ocorre por que a taxa garantida das ONUs não-WDM (118 Mbps) foi atingida. Este atraso pode ser diminuído mediante a atualização de algumas ONUs não-WDM para WDM, dispondo de maior largura de banda para as ONUs não-WDM e, portanto, a taxa garantida é aumentada. A Figura 6.7 mostra a simulação da EPON operando com 4 comprimentos de onda, sendo variado o número de ONUs não-WDM. Pode-se observar que o atraso é diminuído com a atualização das ONUs não-WDM para WDM. Assim, para a EPON operando com 9 ONUs não-WDM, os quadros experimentam um aumento significativo no atraso em, aproximadamente, uma carga total de 2,3 Gbps. Para 8, 7 e 6 ONUs não-WDM há aumento significativo em aproximadamente 2,8 Gbps, 3,3 Gbps e 3,5 Gbps, respectivamente.

Figura 6.6 - Atraso do quadro versus número de comprimento de onda na EPON (N=16).

Figura 6.7 - Atraso do quadro versus número de ONUs não-WDM para a EPON operando com 4 comprimentos de onda (N=16).

Na Figura 6.8 se mostra a simulação da EPON variando igualmente o número de ONUs não-WDM. Porém, também é variado o tamanho máximo do *timeslot* segundo o número de ONUs não-WDM. Assim, para a EPON operando com 9 ONUs não-WDM é obtido um tamanho máximo do *timeslot*, utilizando (5.3), de 27153 bytes, e se observa um atraso máximo de 8 ms. Comparando com os resultados da simulação anterior, se observa uma grande diminuição do atraso máximo experimentado: para 9 ONUs não-WDM de 90 ms para 8 ms. Igualmente, com 8, 7 e 6 ONUs não-WDM se obtém *timeslots* máximos de 30625 bytes, 35089 bytes e 41042 bytes, e um atraso máximo de 4,4 ms, 1 ms e 0,6 ms, respectivamente. Estes resultados mostram que o sistema pode apresentar melhor desempenho variando dinamicamente o *timeslot* máximo a ser alocado segundo o estado da rede.

Figura 6.8 - Atraso do quadro versus número de ONUs não-WDM, variando o tamanho do *timeslot* máximo a ser alocado, para a EPON operando com 4 comprimentos de onda (N=16).

A Figura 6.9 mostra a simulação da EPON com 32 ONUs, das quais 16 são WDM e as demais, não-WDM. Pode-se observar que quando a capacidade máxima de um canal é atingida, a adição de um novo comprimento de onda diminui significativamente o atraso experimentado. Porém, quando a carga total do sistema é aproximadamente 2,8 Gbps, as ONUs WDM experimentam uma carga de aproximadamente 116 Mbps e as ONUs não-WDM, 58 Mbps. Como as ONUs não-WDM compartilham apenas um comprimento de onda para a transmissão, a sua largura de banda garantida de 60 Mbps [20] é praticamente atingida. Portanto, a partir da operação do sistema com 4 comprimentos de onda, observam-se valores similares para o atraso do quadro, entre 2,8 Gbps e 4 Gbps. Este atraso pode ser diminuído, como se verificou, mediante a atualização de algumas ONUs não-WDM para WDM. Porém, as ONUs WDM podem operar apresentando cargas maiores. A Figura 6.10 mostra o atraso médio do quadro para a EPON, variando a carga da ONU não-WDM de 10 Mbps até um máximo de 100 Mbps, enquanto as ONUs WDM experimentam constantemente um aumento no tráfego. Para a EPON operando com 2, 3 e 4 comprimentos de onda as ONUs WDM

apresentam o dobro do tráfego das ONUs não-WDM. Para a EPON operando com 5 e 6 comprimentos de onda, as ONUs WDM apresentam o triplo e o quádruplo, respectivamente, do tráfego das ONUs não-WDM. Pode-se observar que o atraso médio do quadro é diminuído em comparação ao resultado mostrado na Figura 6.9. Isto ocorre porque as ONUs não-WDM estão operando em taxas menores a sua taxa garantida, alcançando-a somente quando a carga total do sistema está em aproximadamente 3 Gbps, 4 Gbps e 5 Gbps, para 4, 5 e 6 comprimentos de onda de operação, respectivamente, podendo-se observar um aumento significativo no atraso. Então, a rede garantirá atrasos menores enquanto as taxas garantidas não sejam atingidas. Portanto, é restringido o tráfego das ONUs não-WDM para operar com uma taxa máxima de 100 Mbps. Garante-se, desta forma, a estabilidade do sistema.

Figura 6.9 - Atraso do quadro versus número de comprimento de onda na EPON (N=32).

Figura 6.10 - Atraso médio do quadro para a EPON variando o número de comprimentos de onda de operação e as ONUs WDM apresentam o dobro, triplo e até o quádruplo da carga das ONUs não-WDM.

6.4.2 Esquema DWBA IPACT estendido para Classes de Serviço

Nas simulações consideramos 16 ONUs e as ONUs WDM são submetidas ao dobro da carga (tráfego de prioridade média e baixa) das ONUs não-WDM. Utilizamos tráfego auto-similar para representação do tráfego de prioridade baixa e média.

A Figura 6.11 apresenta os resultados para o atraso médio do quadro utilizando dois comprimentos de onda. Neste gráfico observa-se uma diminuição significativa do atraso experimentado pelos quadros das três prioridades, em comparação aos resultados do esquema utilizando apenas um comprimento de onda Figura 5.10. O atraso máximo da classe alta diminuiu de aproximadamente 1 ms para 0,4 ms. De forma semelhante, o atraso dos quadros de prioridade média e baixa diminuiu de aproximadamente 4 ms para 1,5 ms e de 1,55 s para 0,55 s, respectivamente. Assim mesmo, os picos dos atrasos de todos os tipos de tráfego foram deslocados para uma carga total do sistema de aproximadamente 2,2 Gbps.

Figura 6.11 - Atraso médio do quadro para os tráfegos de prioridade alta (EF), média (AF) e baixa (BE) utilizando dois comprimentos de onda.

A Figura 6.12 apresenta o atraso médio do quadro da EPON operando com três comprimentos de onda. De maneira similar pode-se observar que os atrasos experimentados pelos quadros de todas as prioridades diminuem em relação à EPON operando com dois comprimentos de onda. O atraso máximo do tráfego de prioridade alta é diminuído de 0,4 ms para 0,2 ms e do tráfego de prioridade média e baixa de 1,5 ms para 0,97 ms e 0,55 s para 0,15 s, respectivamente. Os picos dos atrasos foram deslocados para uma carga total do sistema de aproximadamente 2,8 Gbps.

Figura 6.12 - Atraso médio do quadro para os tráfegos de prioridade alta (EF), média (AF) e baixa (BE) utilizando três comprimentos de onda.

CAPÍTULO 7 Conclusões e Sugestões

7.1 Conclusões

Neste trabalho foi abordada a tecnologia de rede de acesso EPON que pode melhorar a infra-estrutura da primeira milha, oferecendo serviços de banda larga. Neste sentido, foram estudados e simulados vários algoritmos de alocação de largura de banda, como o IPACT, o IPACT estendido para QoS e algoritmos que integram o esquema WDM ao esquema TDM.

O algoritmo IPACT aloca largura de banda empregando a multiplexação estatística, estabelecendo um mecanismo de interrogação eficiente. Este método faz uma boa utilização do canal, aproveitando ao máximo a largura de banda disponibilizada pela fibra óptica.

A utilização da multiplexação estatística gera tempos de ciclos de interrogação adaptativos de acordo com os requisitos de largura de banda das ONUs. Esta é a idéia básica para efetuar a redistribuição da largura de banda não utilizada, uma vez que tempos de ciclo de interrogação reduzidos implicam em aumento da largura de banda disponível para as ONUs que processam cargas elevadas. Este é um conceito interessante, pois permitem às ONUs atuarem em larguras de banda maiores que sua taxa garantida.

A manipulação de um parâmetro como o *timeslot* máximo a ser alocado a uma ONU determina a largura de banda mínima garantida para a ONU numa unidade de tempo. Portanto, este *timeslot* máximo pode ser estabelecido segundo o SLA.

O IPACT estendido para QoS mostra que a utilização da **programação estrita de prioridade**, em combinação com o DBA de serviço limitado, possui característica interessante, segundo qual alguns tipos de tráfego experimentam parcialidade quando as cargas são leves. De fato, sob cargas leves, as ONUs que trabalham com uma fila FIFO apresentam melhor desempenho que as ONUs com programação por prioridade. Este

fenômeno foi chamado de **penalidade de carga-leve**. Foi constatado que o esquema *buffer* de duas etapas elimina completamente a **penalidade de carga-leve** à custa de aumentar o atraso de todos os tipos de tráfego. Entretanto, o esquema de crédito CBR elimina parcialmente a **penalidade de carga-leve**, mas mantém um atraso aceitável para o tráfego de prioridade alta.

Assim mesmo, foram simulados sistemas EPON híbridos operando com três tipos de ONUs. Os resultados mostraram a diminuição do atraso a cada vez que um novo comprimento de onda de operação foi adicionado. Porém, as ONUs não-WDM sempre estarão limitadas pela largura de banda garantida, calculada em função do número deste tipo de ONU. Esta largura de banda garantida pode ser aumentada cada vez que uma ONU não-WDM é atualizada para WDM. Desta forma, é possível disponibilizar maior largura de banda garantida para as ONUs não-WDM, diminuindo o atraso experimentado pelos seus quadros. Melhores resultados foram obtidos quando cada vez o número de ONUs não-WDM foi variado também foi variado o *timeslot* máximo a ser alocado. Observou-se, que o sistema pode experimentar atrasos menores se o *timeslot* máximo a ser alocado é variado segundo o estado da rede. Outras simulações mostraram que as ONUs WDM podem operar apresentando taxas maiores que as ONUs não-WDM, e o sistema garante atrasos menores para os quadros enquanto as ONUs não-WDM e as ONUs WDM operem abaixo da sua taxa garantida. A taxa garantida das ONUs WDM são maiores que das ONUs não-WDM. Também foram integradas as técnicas de suporte a classes de serviço ao esquema DWBA IPACT, apresentando bom desempenho. Os resultados mostraram que as ONUs podem aumentar sua carga, mantendo sempre um controle sobre os tipos de tráfego sensíveis ao atraso. Observou-se uma redução significativa do atraso experimentado pelos tráfegos de prioridade alta e média, especialmente para cargas altas, uma vez que eles são priorizados para a transmissão em cada canal.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como forma de ampliar o estudo comparativo aqui realizado, sugere-se analisar outros esquemas de crédito relatados na literatura, com a finalidade de obter um algoritmo mais adaptado ao tipo de tráfego para diminuir o desperdício de largura de banda.

Também é possível simular esquemas de alocação de largura de banda para EPON utilizando diferentes políticas de enfileiramento prioritário. Normalmente, o tráfego de prioridade baixa experimenta maior perda de quadros em cargas altas, comprometendo a eficiência da transmissão.

Outra possibilidade seria explorar os sistemas de alocação de largura de banda utilizando esquemas de programação por prioridade centralizados.

Por fim, pode ser simulado o esquema DWBA centralizando a programação por prioridade, avaliando o desempenho com a variação do tamanho máximo de *timeslot* a ser atribuído, segundo os comprimentos de onda suportados pela ONU.

Referências Bibliográficas

- [1] Mohammad Llyas and Hussein T. Mouftah, *The handbook of Optical Communication Networks*, CRC Press LLC, Series editor Richard C. Dorf, University of California, 2003.
- [2] Glen Kramer and Gerry Pesavento, “Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next-Generation Optical Access Network”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, pp. 66-73, fevereiro 2002.
- [3] Maode Ma, Yongqing Zhu and Tee Hiang Cheng, “A Bandwidth Guaranteed Polling MAC Protocol for Ethernet Passive Optical Networks”, *INFOCOM 2003, Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 1, pp. 22-31, abril 2003.
- [4] Glen Kramer, *Ethernet Passive Optical Networks*, McGraw-Hill, United State of America, 2005.
- [5] Ton Koonen, “Fiber to the home/fiber to the premises: What, Where, and When?”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, N° 5, pp. 911-934, maio 2006.
- [6] Chang-Hee Lee, Wayne V.Sorin, Byoung Yoon Kim “Fiber to the Home Using a PON Infrastructure”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, N° 12, pp. 4568-4583, dezembro 2006.
- [7] Paul E. Green, “Fiber to the home: The Next Big Broadband Thing”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, N° 100-106, setembro 2004.
- [8] Mark Abrams, Philippe C. Becker, Y. Fujimoto, Vincent O’Byrne, and David Piehler, “FTTP Deployments in the United States and Japan-Equipment Choices and Service Provider Imperatives”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23, N° 1, pp. 236-246, janeiro 2005.
- [9] Frank Effenberger, David Cleary, Onn Haran, Glen Kramer et al., “An Introduction to PON Technologies”, *IEEE Communications Magazine*, Março 2007.
- [10] Alex Gillespie, *Access Networks: Technology and V5 Interfacing*, ARTECH HOUSE, 1997.
- [11] Richard E. Wagner et al., “Fiber-Based Broadband-Access Deployment in the United Stated”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, N° 12, pp. 4526-4540, dezembro 2006.

- [12] Hiromichi Shinohara, "Broadband Access in Japan: Rapidly Growing FTTH Market", *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, N° 9, pp. 72-78, setembro 2005.
- [13] Hassan Naser and Hussein T. Mouftah, "A Class-of-Service Oriented Packet Scheduling (COPS) Algorithm for EPON-Based Access Networks", *Transparent Optical Networks, 7th International Conference IEEE*, vol.1, pp. 232-236, 2005.
- [14] Michael P. McGarry, Martin Maier, and Martin Reisslein, "Ethernet PONs: A Survey of Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) Algorithms", *IEEE Communications Magazine*, vol.42, agosto 2004.
- [15] Martin Maier, Martin Herzog and Martin Reisslein, "STARGATE: The next evolutionary step toward unleashing the potential of WDM EPONs", *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, N° 5, pp. 50-56, maio 2007.
- [16] Glen Kramer, Biswanath Mukherjee and Gerry Pasavento, "Ethernet PON (EPON): Design and Analysis of an Optical Access Network", *Photonic Network Communications*, vol. 3, N° 3, pp. 307-319, julho 2001.
- [17] Su-il Choi and Jae-doo Huh, "Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for Multimedia Services over Ethernet PONs", *ETRI Journal*, Vol. 24, N° 6, pp. 465-468, dezembro 2002.
- [18] Yuanqiu Luo and Nirwan Ansari "Bandwidth Allocation for Multiservice Access on EPONs", *IEEE Optical Communications*, vol. 43, N° 2, pp. S16-S21, fevereiro 2005.
- [19] Jun Zheng and Hussein T. Mouftah, "Media Access Control for Ethernet Passive Optical Network: An Overview", *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, N° 2, pp. 145-150, fevereiro 2005.
- [20] Glen Kramer, Biswanath Mukherjee and Davis Gerry Pasavento, "IPACT: A Dynamic Protocol for an Ethernet PON (EPON)", *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, N° 2, pp. 74-80, fevereiro 2002.
- [21] Chadi M. Assi, Yinghua Ye and Mohamed A. Ali, "Dynamic Bandwidth Allocation for Quality-of-Service Over Ethernet PONs", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, N° 9, pp. 1467-1477, novembro 2003.
- [22] Glen Kramer, Biswanath Mukherjee, Sudhir Dixit, Yinghua Ye "Supporting differentiated classes of service in Ethernet passive optical networks", *Journal of Optical Networking*, vol. 1, N° 8 & 9, agosto & setembro 2002.
- [23] Hee-Jung Byun, Ji-Myung Nho and Jong-Tae Lim, "Dynamic bandwidth allocation algorithm in ethernet passive optical networks", *Electronics Letters*, vol. 39 N° 13, pp. 1001-1002, junho 2003.

- [24] David Gutierrez, Kyeong Soo Kim, Salvatore Rotolo, Fu-Tai An and Leonid G. Kazovsky, "FTTH Standards, Deployments and Research Issues", *8th Jint Conference on Information Sciences; Symposium on Photonics, Networking and Computing, Session: PNC-5 Optical Communications*, pp. 1358-1361, julho 2005.
- [25] Hiroaki Yamamoto, Susumu Morikura, Kuniaki Utsumi and Katsuyuki Fujito, "Increasing Acceptable Number of signals in Subcarrier Multiple Access Optical networks in the presence of high optical beat interference", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, N° 9, setembro 1999.
- [26] Glen Kramer and Keiji Tanaka "Advances in Optical Access Networks", *Optical Fiber Communications Conference, OFC/NFOEC*, vol. 4, pp. 3, março 2005.
- [27] Full Service Access Networks, <http://www.fsanweb.org/>.
- [28] ITU-T G.983.x, The leader on BPON standards, <http://www.itu.int/itudoc/gs/promo/tsb/83121.pdf>.
- [29] ITU-T G.984.x, The leader on GPON standards <http://www.itu.int/itudoc/gs/promo/tsb/85155.pdf>.
- [30] Manolis G. H. Katevenis, Iakovos Mavroidis, Georgios Sapountzis, Eva Kalyvianaki, Joannis Mavroidis and Georgios Glykopoulos "Wormhole IP Over (Connectionless) ATM", *IEEE/ACM Transaction on Networking*, vol. 9, N° 5, outubro 2001.
- [31] Frank Effenberger, Glen Kramer and Bernd Hesse "Passive Optical Networking Update", *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, N° 3, pp. S6-S8, março 2007.
- [32] Howard Frazier and Gerry Pesavento "Ethernet Takes on the First Mile" *IT Professional IEEE*, vol. 3, N° 4, pp. 17-22, julho & agosto 2001.
- [33] Matthew N. O, Sadiku and Mohammad Ilyas, *Simulation of LOCAL AREA NETWORKS*, CRC Prees, U.S., 1995.
- [34] Donald J. Sterling and Steven P. Wissler, *The Industrial Ethernet Networking Guide*, Thomson Delmar Learning, NY, 2003.
- [35] B.N.Nesai et al., "An Optical Implementation of the Packet-Based (Ethernet) MAC in a WDM Passive Optical Network Overlay", *Optical Fiber Communication Conference OFC '01*, vol. 3, pp. WN5-1-WN5-3, 2001.
- [36] Hidekazu Miyoshi, Tohru INOUE and Kazuhisa Yamashita, "D-CRED: Efficient Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm in Ethernet Passive Optical Networks", *Information & Communication Systems, SEI Technical Review*, N° 58, junho 2004.

- [37] Jun Zheng and Hussein T. Mouftah, "Media Access Control for Ethernet Passive Optical Networks: An Overview", *IEEE Communications Magazine*, vol.43, N° 2, pp. 145-150, fevereiro 2005.
- [38] IEEE 802.3ah, Ethernet in the First Mile Task Force, <http://www.ieee802.org/3/efm/index.html>.
- [39] Hideyusiki Shimonishi, Ichinoshin Maki, Tutomu Morasi and Masayuki Murata "Dynamic Fair Bandwidth Allocation for DiffServ Classes", *Communications, ICC 2002. IEEE International Conference on*, vol. 4, pp. 2348-2352, 2002.
- [40] Jun Zheng and Hussein T. Mouftah, "An Adaptive MAC Polling Protocol for Ethernet Passive Optical Networks", *IEEE International Conference ICC*, vol. 3, pp. 1874-1878, maio 2005.
- [41] Glen Kramer, Biswanath Mukherjee and Davis Gerry Pesavento, "Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time (IPACT), A Dynamic Bandwidth Distribution Schema in an Optical Access Network", *Photonic Network Communications*, pp 89-104, julho 2002.
- [42] A. Hadjiantonis, S. Sherif, A. Khalil, T. Rahman, G. Ellinas, M. F. Arend, and M. A. Ali, "A Novel Decentralized Ethernet-Based PON Access Architecture for Provisioning Differentiated QoS", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, N° 11, pp. 2483-2497, novembro 2004.
- [43] Maode Ma, Yongqing Zhu and Tee Hiang Cheng, "A bandwidth guaranteed Polling MAC Protocol for Ethernet Passive Optical Networks", *INFOCOM, Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol.1, pp. 22-31, abril 2003.
- [44] Jongwook Jang and E. K. Park, "Dynamic Resource Allocation for Quality of Service on a PON with Home Networks", *Topics in Lightwave, IEEE Communications Magazine*, vol.38, pp. 184-190, junho 2000.
- [45] Michael P. McGarry, Martin Reisslein and Martin Maier, "WDM Ethernet Passive Optical Networks", *IEEE Optical Communications Magazine*, vol. 44, pp. N° 2, pp. 15-22, fevereiro 2006.
- [46] Ahmad R. Dhaini, Chadi M. Assi, Martin Maier and Abdallah Shami "Dynamic Wavelength and Bandwidth Allocation in Hybrid TDM/WDM EPON Networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, N° 1, janeiro 2007.
- [47] Abdallah Shami, Xiaofeng Bai, Chadi M. Assi and Nassir Ghani "Jitter Performance in Ethernet Passive Optical Networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, N° 4, abril 2005.

- [48] NamUk Kim and Minho Kang, "Priority-Based Optimized Bandwidth Reservation for Efficient Differentiated Services in Ethernet-PON", *IEICE TRANS. COMMUN.*, vol. E88-B, N° 10, outubro 2005.
- [49] Michael P. McGarry, Martin Maier and Martin Reisslein, "An Evolutionary WDM Upgrade for EPONs", <http://www.fulton.asu.edu/~mre/EPONupgrade.pdf> (data de acesso maio 2007).
- [50] Teruyuki Hasegawa, Tomohiko Ogishi, Toru Hasegawa "A Framework on Gigabit Rate Packet Header Collection for Low-cost Internet Monitoring System", *IEEE International Conference ICC*, vol. 4, pp.2206-2211, 2002.
- [51] Will E. Leland, Murad S. Taqqu and Daniel V. Wilson "On the self-similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)", *IEEE/ACM Transaction on Networking*, vol. 2, N° 1, pp. 1-15, fevereiro 1994.
- [52] Parag Pruthi, Ajit K. Jena and Adrian Popescu "HTTP Interactions with TCP", A 11th ITC Specialist Seminar on Multimedia and Nomadic Communications, Yokohoma, outubro 1999.
- [53] Kae Hsiang Kwong, David Harle and Ivan Andonovic, "Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for Differentiated Services over WDM EPONs", *Communication Systems, ICCS 2004*, The Ninth International Conference on, pp. 116-120, 6-8 setembro 2004.
- [54] Ahmad R. Dhaini, Chadi M. Assi and Abdallah Shami, "Dynamic Bandwidth Allocation Schemes in Hybrid TDM/WDM Passive Optical Networks", *IEEE 3rd Networking Conference CCNC*, vol. 1, pp. 30-34, janeiro 2006.
- [55] Michael P. MacGarry, Martin Reisslen and Martin Maier, "WDM Ethernet Passive Optical Networks", *IEEE Optical Communications Magazine*, vol. 44, N° 2, pp. 15-22, fevereiro 2006.

Publicação Associada

- [1] Carmen O. Carrasco Arbieto e Amílcar Careli César “**Algoritmos de Alocação Dinâmica de Largura de banda para Redes de Acesso TDM/WDM EPON**”, Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBRT 2007, pp. 1- 6.