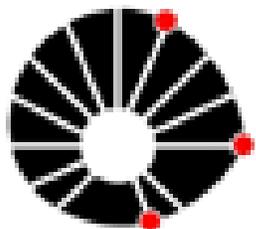


**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE SEMICONDUTORES, INSTRUMENTOS E FOTÔNICA**



UNICAMP

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Análise Crítica de Plataformas GPON e EPON para
Aplicação em Redes Ópticas de Acesso de Alta
Capacidade**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Mauricio Lopez Bonilla

Orientador: Prof. Dr. Edson Moschim

Co-orientador: Dr. Felipe Rudge Barbosa

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Felipe Rudge Barbosa – (presidente)

Prof. Dr. Yuzo Iano (FEEC/Unicamp)

Dr. Mário Tosi Furtado (Fundação CPqD)

Campinas, SP – Brasil

Dezembro - 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -UNICAMP

L881a	<p>Lopez Bonilla, Mauricio Análise crítica de plataformas GPON e EPON para aplicação em redes ópticas de acesso de alta capacidade / Mauricio Lopez Bonilla. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.</p> <p>Orientador: Edson Moschim. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Comunicações óticas. 2. Telecomunicações. I. Moschim, Edson. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
-------	--

Título em Inglês: Critical analysis of GPON and EPON platforms for application in high capacity optical access networks

Palavras-chave em Inglês: Optical communication, Telecommunication

Área de concentração: Eletrônica, Optoeletrônica e Microeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Yuzo Iano, Mario Tosi Furtado

Data da defesa: 02/12/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Mauricio López Bonilla

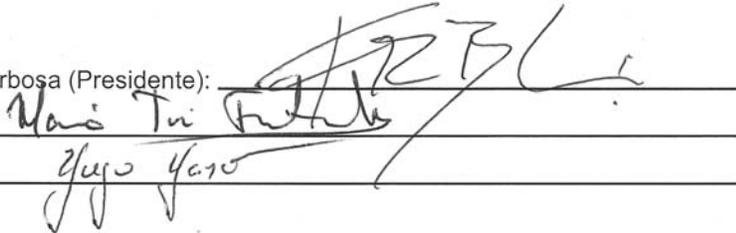
Data da Defesa: 2 de dezembro de 2008

Título da Tese: "Análise Crítica de Plataformas GPON e EPON para Aplicação em Redes Ópticas de Acesso de Alta Capacidade"

Prof. Dr. Felipe Rudge Barbosa (Presidente):

Dr. Mário Tosi Furtado:

Prof. Dr. Yuzo Iano:



The image shows three horizontal lines representing the signatures of the jury members. The first line is signed by Prof. Dr. Felipe Rudge Barbosa (Presidente) with a stylized signature. The second line is signed by Dr. Mário Tosi Furtado with a signature that includes the name 'Mário Tosi Furtado'. The third line is signed by Prof. Dr. Yuzo Iano with a signature that includes the name 'Yuzo Iano'.

Resumo

Neste trabalho apresentamos um estudo atual das plataformas GPON e EPON, mostrando suas principais características técnicas, realizando uma análise comparativa encontrando as vantagens e desvantagens entre as duas tecnologias. Utilizou-se o software livre analisador de protocolos Ethereal, para o estudo experimental de um enlace ponto a ponto Gigabit para diversos testes de tráfego, obtendo a perspectiva desde o modelo OSI do enlace. Também se realizaram estudos econômicos sobre a factibilidade ao momento de desenvolver uma rede óptica passiva, encontrando e apresentando argumentos válidos tanto econômicos como técnicos ao momento de implantar e massificar este tipo de redes em uma região.

Palavras-chave: Redes Ópticas Passivas, GPON, EPON, comparação tecno-econômica.

Abstract

This work presents a study of the current GPON and EPON platforms, showing its main technical characteristics, making a comparative analysis finding the advantages and disadvantages between the two technologies. We used the free software Ethereal, which is an analyzer of protocols for the experimental study of a point to point Gigabit link doing tests for different kinds of traffic to get the perspective from the OSI. We also conducted studies on the economic feasibility of developing a passive optical network, finding and presenting valid economic and technical arguments to deploy and expand this type of networks in a region.

Keywords: Passive Optical Networks, GPON, EPON, tecno-economic comparison.

Agradecimentos

Foram muitas as pessoas de grande importância para mim que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus pais e irmã que sempre apoiaram e acreditaram em minhas capacidades, sempre me dando força e coragem para enfrentar os obstáculos da vida.

Agradeço especialmente às duas pessoas que fizeram possível o desenvolvimento e a conclusão do trabalho, a minha namorada; a linda Maria Catalina Parra que foi minha força, motivação e alegria para acabar satisfatoriamente meu trabalho e ao meu amigo David Giraldo que sempre esteve presente em todos os momentos.

Aos meus orientadores Edson Moschim e Felipe Rudge pela colaboração brindada, aceitação no grupo e pela oportunidade de realizar o mestrado na prestigiosa UNICAMP.

E para finalizar, quero agradecer à CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, irmã e namorada

“A imaginação é mais importante que o conhecimento”

Albert Einstein

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Glossário	xv
1. Introdução Geral	1
1.1 Redes de Acesso (Última Milha).....	3
1.1.1 Redes de Acesso Via Par Trançado.....	4
1.1.2 Redes de Acesso Via Fibra Óptica e Cabo Coaxial.....	6
1.1.3 Redes de Acesso Via Fibra Óptica	6
1.1.3.1 Redes APON (ITU-T G.983)	8
1.1.3.2 Redes GPON (ITU-T G.984)	10
1.1.3.3 EFM (IEEE 802.3ah).....	11
1.1.3.4 Resumo das Tecnologias APON, GPON e EPON	13
1.2 Mercado das Redes GPON e EPON no Mundo	14
1.3 Organização do Trabalho e Motivação.....	15
1.4 Principais Contribuições deste Trabalho	16
1.5 Referências	17
2. REDES GPON	19
2.1 Arquitetura da Rede Óptica de Acesso.....	20
2.2 Conceitos Gerais sobre GPON	22
2.2.1 Possíveis Configurações <i>Dúplex</i> para GPON.....	24
2.3 Especificações da Subcamada PMD (<i>Physical Medium Dependent</i>).....	27
2.3.1 Requisitos da Subcamada PMD para GPON.....	27
2.3.2 Interação entre a Subcamada PMD da GPON e a Subcamada TC.....	28
2.4 <i>Frame</i> de Dados no Canal de Distribuição (<i>Downstream</i>)	30
2.5 <i>Frame</i> de Dados no Canal de Retorno (<i>Upstream</i>)	32
2.6 Alocação do Tempo do Cabeçalho da Camada Física	33
2.7 GFP: <i>Generic Framing Procedure</i>	35

2.7.1	Modo de Encapsulamento de informação GPON (GEM).....	36
2.8	Referências	37
3.	REDES EPON	39
3.1	Foco do Estudo de IEEE 802.3 (Ethernet)	40
3.2	Transmissão de Dados na EPON.....	41
3.3	Canal de Distribuição (<i>Downstream</i>)	42
3.4	Canal de Retorno (<i>Upstream</i>).....	43
3.4.1	Acesso ao Meio Baseado em Contenda contra Acesso Garantido	43
3.4.2	Controle de Acesso ao Meio para o Meio Garantido	44
3.4.3	Protocolo de Controle Multi-Ponto: MPCP	46
3.4.3.1	Alocação de Banda	46
3.4.3.2	Processo de Auto-Descobrimto (<i>autodiscovery</i>)	52
3.5	Emulação da Topologia Lógica.....	54
3.5.1	Emulação da Topologia Ponto-Ponto (P2PE)	55
3.5.2	Emulação do Meio Compartilhado (SME).....	56
3.5.3	Combinação de P2PE e SME	58
3.5.4	Solução Adotada pelo Padrão.....	58
3.6	Formato do <i>frame</i> Preâmbulo	59
3.7	Controle do LASER	60
3.8	Correção de Erros Caminhante: FEC (<i>Forward Error Correction</i>).....	61
3.9	Enlace Ponto a Ponto Gigabit Ethernet	62
3.9.1	Resultado Experimental.....	64
3.9.1.1	Prova com Comando PING	65
3.9.1.2	Prova com CHAT (bate-papo).....	68
3.9.1.3	Prova Compartilhando <i>Desktop</i>	69
3.9.1.4	Prova Enviando Arquivo	71
3.10	Referências	73
4.	Comparação entre GPON e EPON	75
4.1	Diferenças Básicas entre GPON e EPON.....	76
4.1.1	Largura de Banda	77
4.1.2	Alcance	78
4.1.3	Sistema de Gerenciamento	78
4.1.4	Segurança e Proteção.....	78
4.1.5	Quantidade de Usuários por PON	79
4.1.6	Escalabilidade e Flexibilidade	79
4.1.7	Eficiência de Cada Padrão.....	79
4.2	Eficiência das Redes GPON e EPON.....	80
4.2.1	Eficiência na GPON	80
4.2.1.1	Cabeçalho na Transmissão no Canal de Distribuição	80
4.2.1.2	Cabeçalho na Transmissão no Canal de Retorno	81
4.2.2	Eficiência na EPON.....	81

4.2.2.1	Cabeçalho por Agendamento.....	82
4.2.2.2	Eficiência Absoluta na EPON	86
4.3	Comparação Econômica entre GPON e EPON.....	86
4.4	Referências	94
5.	Conclusão	95
5.1	Trabalhos Futuros	96
Anexo A		99
Ethereal.....		99
Anexo B		101
Comando PING.....		101

Lista de Figuras

Figura 1: Rede de Acesso.....	3
Figura 2: Tipos de Redes de Acesso.	4
Figura 3: Redes Ópticas de Acesso.....	8
Figura 4: Arquitetura da Rede.....	20
Figura 5: Configuração de Referência para GPON (G.984.1).....	21
Figura 6: Modelo <i>Dúplex</i> G.984.1	23
Figura 7: Sistema GPON <i>Dúplex</i> : Sistema <i>Dúplex</i> de Fibra	24
Figura 8: Sistema GPON <i>Dúplex</i> : Sistema <i>Dúplex</i> de OLT	25
Figura 9: Sistema GPON <i>Dúplex</i> : Sistema <i>Full Dúplex</i>	25
Figura 10: Sistema GPON <i>Dúplex</i> : Sistema <i>Parcial Dúplex</i>	26
Figura 11: <i>Frame</i> de <i>downstream</i> : GPON	30
Figura 12: Bloco de Controle PCBd	31
Figura 13: <i>Frame</i> de Dados GPON no Canal de Retorno.....	32
Figura 14: Cabeçalho do <i>Frame</i> GEM.....	36
Figura 15: Modelo OSI e Camadas do Modelo de IEEE 802.3	40
Figura 16: Transmissão de <i>Downstream</i> em EPON	42
Figura 17: Transmissão de <i>Upstream</i> em EPON	44
Figura 18: Protocolo MPCP: Alocação de Banda.....	48
Figura 19: Alocação do <i>timeslot</i> de Forma Seqüencial.....	49
Figura 20: Alocação do <i>timeslot</i> de Forma Canalizada	50
Figura 21: Colisões Possíveis Devido a Atrasos na Mensagem GATE.....	50
Figura 22: Tempo de Chegada GATE e Tempo de Início do <i>timeslot</i> (startTime).....	51
Figura 23: Método de Alocação de Banda Usando MPCP	52
Figura 24: Método de Auto-Descobrimto Usando MPCP	54
Figura 25: Modo <i>Downstream</i> de P2PE	55
Figura 26: Modo <i>Upstream</i> de P2PE	56
Figura 27: Emulação do Meio Compartilhado no Canal de Distribuição.....	57
Figura 28: Emulação do Meio Compartilhado no Canal de Retorno.....	58
Figura 29: Solução Final para a Emulação da Topologia Lógica	59
Figura 30: Formato do <i>Frame</i> Préâmbulo.....	60
Figura 31: Enlace Ponto a Ponto Gigabit Ethernet	64
Figura 32: Comando PING	66
Figura 33: Prova com CHAT	68

Figura 34:	Prova Compartilhando Desktop	70
Figura 35:	Prova Enviando Arquivo	71
Figura 36:	Estrutura da Rede GPON.....	76
Figura 37:	Estrutura da Rede EPON	77
Figura 38:	Quantidade de ONTs necessárias segundo a largura de banda por usuário. 89	
Figura 39:	Quantidade de OLTs necessárias segundo a largura de banda por usuário.. 89	
Figura 40:	Custo Total das Redes GPON e EPON	90
Figura 41:	Sensibilidade do Custo da ONT na GPON com Relação a EPON.....	91
Figura 42:	Custo da OLT na GPON para Igualar o Custo com a Rede EPON.....	92
Figura 43:	Janela Principal do Ethereal	100

Lista de Tabelas

Tabela 1: Demanda de Largura de Banda pelo Uso dos Novos Serviços	2
Tabela 2: Família de Tecnologias DSL	5
Tabela 3: Padrão GPON	11
Tabela 4: Trabalho Desenvolvido pelo Grupo <i>EFM</i>	12
Tabela 5: Características Redes APON, GPON e EPON.....	13
Tabela 6: Probabilidade de uma Rajada com Erros Graves em Função do Comprimento do Delimitador G.984.2.....	34
Tabela 7: Alocações Sugeridas de Tempo do cabeçalho.....	35
Tabela 8: Valores do Cabeçalho para o Canal de <i>Upstream</i>	85
Tabela 9: Valores do Cabeçalho para o Canal de <i>Downstream</i>	85
Tabela 10: Eficiência Absoluta na EPON	86
Tabela 11: Dimensionamento das Redes GPON e EPON.....	88

Glossário

AES: Padrão de Criptografia Avançado – (*Advanced Encryption Standard*);

APD: Fotodiodo avalanche – (*PhotoDiode Avalanche*);

APON: Redes Ópticas Passivas ATM – (*ATM Passive Optical Networks*);

ATM: Modo de Transferência Assíncrono - (*Asynchronous Transfer Mode*);

CATV: TV a Cabo - (*Cable TV*);

CO: Central do Fornecedor de Serviços - (*Central Office*);

CSMA/CD: Acesso Múltiplo por Vigilância da Portadora com Detecção de Colisões - (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection*);

DBA: Algoritmo de Alocação de Banda Dinâmico - (*Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm*);

DSL: Linha Digital do Assinante - (*Digital Subscriber Line*);

DWDM: Multiplexação Densa por Comprimento de Onda – (*Dense Wavelength Division Multiplexing*);

EFM: Ethernet na Primeira Milha – (*Ethernet in the First Mile*);

EPON: Redes Ópticas Passivas Ethernet – (*Ethernet Passive Optical Networks*);

FDM: Modulação por Divisão de Frequência – (*Frequency Division Modulation*);

FEC: Correção de Erros Caminhante – (*Forward Error Correction*);

FP-LD: Laser Fabry-Perot – (*Fabry Perot Laser Diode*);

- FSAN:** Rede de Acesso a Múltiplos Serviços – (*Full Service Access Network*);
- FTTB:** Fibra até o Prédio – (*Fiber to the Building*);
- FTTC:** Fibra até a Calçada – (*Fiber to the Curb*);
- FTTCab:** Fibra até o Gabinete – (*Fiber to the Cabinet*);
- FTTH:** Fibra até o Lar – (*Fiber to the Home*);
- FTTP:** Fibra até o Usuário – (*Fiber to the Premises*);
- GbE:** Gigabit Ethernet;
- GEM:** Método de Encapsulamento GPON – (*GPON Encapsulation Method*);
- GFP:** Procedimento do *Frame* Genérico – (*Generic Framing Procedure*);
- GMI:** Interface do Meio Gigabit Independente – (*Gigabit Media Independent Interface*);
- GPON:** Redes Ópticas Passivas Gigabit – (*Gigabit Passive Optical Networks*);
- HDTV:** Televisão de Alta Definição – (*High Definition Television*);
- HFC:** Redes Híbridas de Fibra e cabo Coaxial;
- IEEE:** Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos – (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*);
- ISO:** Organização de Padronização Internacional – (*International Standard Organization*);
- IP:** Protocolo Internet – (*Internet Protocol*);
- ITU:** Organização Internacional das Telecomunicações – (*International Telecommunication Union*);
- LAN:** Rede de Área Local – (*Local Area Network*);
- LLC:** Controle de Enlace Lógico – (*Logical Link Control*);
- LLID:** Identificação de Enlace Lógico – (*Logical Link Identification*);
- LMDS:** Sistema de Distribuição Local Multiponto – (*Local Multipoint Distribution System*);
- MAC:** Controle de Acesso ao Meio – (*Medium Access Control*);

- MAN:** Rede de Área Metropolitana – (*Metropolitan Area Network*);
- MDI:** Interface do Meio Dependente – (*Medium Dependent Interface*);
- MMDS:** Sistema Multicanal de Distribuição de Microondas – (*Multichannel Multipoint Distribution Service*);
- MPCP:** Protocolo de Controle Multi-Ponto – (*Multi-point Control Protocol*);
- NE:** Elemento de Rede – (*Network Element*);
- NRZ:** Não Há Retorno para Zero – (*Non Return to Zero*);
- OAM:** Operação, Administração e Manutenção – (*Operation Administration and Maintenance*);
- OAN:** Rede Óptica de Acesso – (*Optical Access Network*);
- ODN:** Rede de Distribuição Óptica – (*Optical Distribution Network*);
- OLT:** Terminal de Linha Óptica – (*Optical Line Terminal*);
- OMCI:** Instrumentação para a Administração do Cliente – (*OpenManage Client Instrumentation*);
- ONT:** Terminal de Rede Óptico – (*Optical Network Terminal*);
- ONU:** Unidade de Rede Óptica – (*Optical Network Unit*);
- OSI:** Sistema Aberto de Interconexão – (*Open System Interconnection*);
- PCB:** Bloco de Controle Físico – (*Physical Control Block*);
- PCS:** Subcamada Física de Codificação – (*Physical Coding Sublayer*);
- PLOAM:** Operações da Camada Física, Administração e Manutenção – (*Physical Layer Operations, Administration and Maintenance*);
- PMA:** Subcamada do Meio Físico Adjunto – (*Physical Medium Attachment*);
- PMD:** Subcamada Dependente do Meio Físico – (*Physical Medium Dependent*);
- PON:** Redes Ópticas Passivas – (*Passive Optical Networks*);
- POTS:** Serviço de Telefonia Básico – (*Plain Old Telephone Service*);

- QoS:** Qualidade de Serviço - (*Quality of Service*);
- RDSI:** Rede Digital de Serviços Integrados;
- RF:** Rádio Frequência;
- RS:** Subcamada de Reconciliação – (*Reconciliation Sublayer*);
- RTT:** Tempo de Ida e Volta – (*Round Trip Time*);
- SDH:** Hierarquia Digital Síncrona - (*Synchronous Digital Hierarchy*);
- SLA:** Contratos de Nível de Serviço - (*Service Level Agreements*);
- SMF:** Fibra Monomodo Padrão – (*Single Mode Fiber*);
- SNI:** Interface de Serviço de Nó – (*Service Node Interface*);
- SONET:** Rede Óptica Síncrona - (*Synchronous Optical Network*);
- TC:** Subcamada de Convergência de Transmissão – (*Transmission Convergence*);
- TCP:** Protocolo de Controle de Transmissão -(*Transmission Control Protocol*);
- TDM:** Modulação por Divisão de Tempo – (*Time Division Modulation*);
- UDP:** Protocolo de Datagramas de Usuário -(*User Datagram Protocol*);
- UNI:** Interface de Rede de Usuário -(*User Network Interface*);
- VoD:** Vídeo por Demanda -(*Video on Demand*);
- VPN:** Redes Privadas Virtuais -(*Virtual Private Networks*);
- WAN:** Rede de Área Ampla -(*Wide Area Network*);
- WDM:** Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda - (*Wavelength Division Multiplexing*);

1. Introdução Geral

Durante a década dos anos noventa presenciamos um desenvolvimento tecnológico significativo na área das *Redes Ópticas*. Avanços tecnológicos como: *Roteamento de caminho óptico (wavelength cross-connect)*, *Multiplexação densa por comprimento de onda (DWDM: dense wavelength division multiplexing)*, *Amplificação óptica e Chaveamento de Alta Velocidade*, encontraram seu caminho e desenvolvimento nas *Redes de Área Ampla (WAN: Wide Area Network)* provocando um incremento substancial na capacidade e fiabilidade do *backbone* das redes de telecomunicações.

Ao mesmo tempo globalizou-se o uso da arquitetura *Fast-Ethernet: Ethernet Rápida*, (100Mbps) no mundo para as *Redes de Área Local (LAN: Local Area Network)*, ainda que algumas empresas incrementaram a capacidade das suas redes locais até taxas de 1000Mbps, graças ao novo padrão *Gigabit Ethernet* adotado pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) em Junho de 1998 e chamado *IEEE 802.3z*.

Atualmente a demanda de largura de banda cada vez é maior nos usuários das redes, devido ao surgimento de novos serviços oferecidos tais como televisão digital, telefonia IP, videoconferência entre outros [1.1]. Hoje em dia na maioria dos lares existem redes locais devido ao aumento de computadores nos domicílios, permitindo que várias máquinas possam compartilhar a mesma impressora ou a mesma conexão a Internet [1.2]. Usualmente essas pequenas redes são construídas usando um *switch* o um *hub* de baixo custo, aparelhos que conseguem interconectar desde quatro até dezesseis dispositivos de rede. Também essas redes podem-se construir usando a arquitetura do padrão *IEEE 802.11*

LAN sem fio (wireless LAN) fornecendo taxas de transmissão desde 11Mbps até 54Mbps. Redes com ou sem fio, são essencialmente pequenas LAN que fornecem interconexão a alta velocidade para vários pontos na rede [1.3].

Estes avanços no *backbone*, nas empresas e nas redes internas dos usuários, unido ao formidável crescimento do tráfego da Internet, acentuaram o problema presente hoje nas redes de acesso; a *Capacidade*, formando um ponto de gargalo na última milha da rede (a rede de acesso), devido a que as tecnologias usadas atualmente (xDSL, HFC, entre outras) não suportam os novos serviços que a convergência das redes oferecem como *Vídeo sob Demanda* (VoD: *Video on Demand*), telefonia sobre IP, videoconferência e *Televisão de Alta Definição* (HDTV: *High Definition Television*). Serviços que somente a fibra óptica sustenta, convertendo-se as fibras no melhor canal de transmissão na atualidade desde o ponto de vista da capacidade de informação.

Demanda de Largura de Banda (Mbps)

Vídeo sob Demanda (VoD)	15
Redes Privadas Virtuais (VPN)	2
Videoconferência	1
Navegação na Internet	1,5
Jogos Online	1
Duas conversações telefônicas IP	0,128
Televisão de alta definição (HDTV)	19,2

Tabela 1: Demanda de Largura de Banda pelo Uso dos Novos Serviços

A Tabela 1 mostra a demanda atual da largura de banda nas redes de telecomunicações. Atualmente a fibra óptica é o único meio de transmissão que suporta as taxas apresentadas na tabela anterior, deste modo vai jogar um papel essencial convertendo-se na solução tecnológica e dando passo ao futuro próximo das telecomunicações: Redes Ópticas Passivas *PON* [1.4] (*Passive Optical Networks*). Em capítulos posteriores se apresentaram em detalhe aquelas redes PON as quais são o tema central deste trabalho.

Na próxima seção iremos também mencionar brevemente as tecnologias de acesso atuais.

1.1 Redes de Acesso (Última Milha)

A Rede de Acesso envolve os elementos tecnológicos que suportam os enlaces de telecomunicações entre os usuários finais e o último nó da rede. Com frequência denomina-se *local loop* ou simplesmente a *última milha*. Seus principais componentes são: os meios de comunicação (par trançado, cabo coaxial, fibra óptica, canal de radiofrequência) e os elementos que realizam a adequação do sinal aos mesmos. A Figura 1 mostra a rede de acesso, desde a casa do usuário até o nó assentado na central de comutação do provedor.



Figura 1: Rede de Acesso

As redes de acesso podem-se classificar em quatro grupos:

- Redes de acesso via *par trançado* entres as quais se destacam as tecnologias **xDSL**: Linha Digital para o Assinante (*Digital Subscriber Line*) e a tecnologia **RDSI**: Rede Digital de Serviços Integrados.
- Redes de acesso sem fio como **Satélite**, **MMDS**: Sistema Multicanal de Distribuição de Microondas (*Multichannel Multipoint Distribution Service*), **LMDS**: Sistema de Distribuição Local Multiponto (*Local Multipoint Distribution System*) e **Celular**.
- Redes de acesso via fibra óptica e cabo coaxial chamadas redes híbridas **HFC** (Híbrida Fibra Coaxial).
- Redes de acesso via fibra totalmente ópticas como **SONET/SDH**, e redes **PON**: Redes Ópticas Passivas (*Passive Optical Networks*).

A Figura 2 mostra a classificação das redes de acesso mencionada anteriormente.

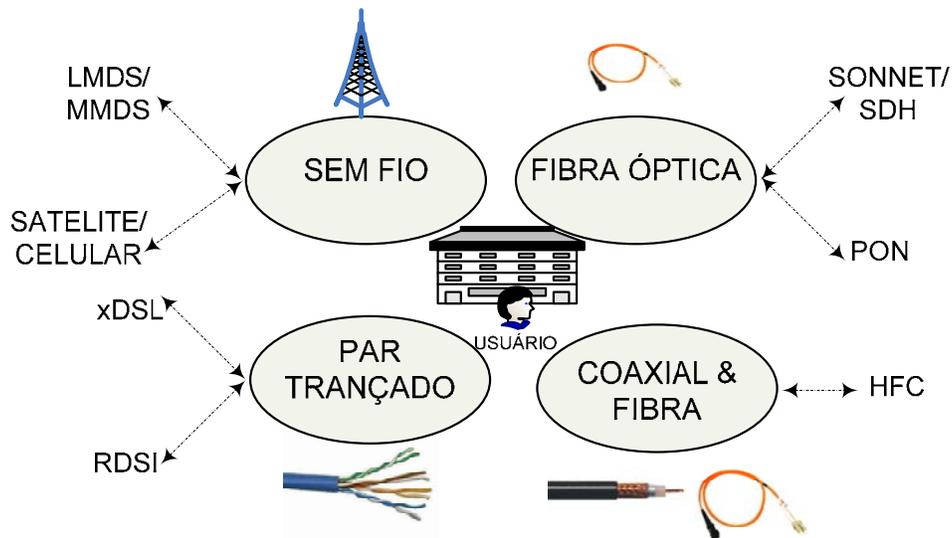


Figura 2: Tipos de Redes de Acesso.

1.1.1 Redes de Acesso Via Par Trançado

Dois acontecimentos importantes impulsionaram às tradicionais companhias operadoras telefônicas a pesquisar uma tecnologia que permitisse o acesso ao serviço de banda larga sobre seus tradicionais pares trançados de cobre: As novas aplicações multimídia e o acesso rápido a conteúdos da Internet.

Durante anos estudou-se sob as limitações das redes telefônicas e em particular se alcançariam superar os 14,4Kbps e depois os 28,8Kbps utilizando pares trançados de cobre até chegar à taxa de 56,6Kbps. Depois vimos como os novos modems *xDSL* se aproximaram a velocidades de 10Mbps.

A tecnologia *xDSL* [1.5], surge pela necessidade de aumentar a capacidade de transmissão do par de cobre. *xDSL* faz referência a todas as tecnologias da família *DSL* as quais utilizam técnicas de modulação modernas ajudadas pelos avanços no processamento digital de sinais para conseguir transmitir a altas velocidades sobre o *local loop*. Na 0 mostra-se um resumo comparativo entre algumas das tecnologias *xDSL*.

Tipo de DSL	Simétrico/ Assimétrico	Distancia Máxima do enlace (m)	Taxa Recepção (Download)	Taxa Transmissão (Upload)
IDSL (RDSI Básico)	Simétrico	5400	192 Kbps	192 Kbps
ADSL (ANSI T1.413-1998 Issue 2)	Assimétrico	2000	8 Mbps	1 Mbps
ADSL 2 (ITU G.992.3/4)	Assimétrico	2500	12 Mbps	1 Mbps
ADSL 2+ (ITU G.992.5)	Assimétrico	2500	24 Mbps	1 Mbps
ADSL G.lite (ITU G.992.2)	Assimétrico	5400	4.0 Mbps	0.5 Mbps
SDSL: Symmetric Digital Subscriber Line	Simétrico	3000	400 Kbps 800 Kbps 1200 Kbps 2048 Kbps	400 Kbps 800 Kbps 1200 Kbps 2048 Kbps
HDSL: High bit rate Digital Subscriber Line (Dois pares) (ITU G.991.1)	Simétrico	3600	1.544 Mbps	1.544 Mbps
SHDSL: Single-pair High- speed Digital Subscriber Line (ITU G.991.2)	Simétrico (Um par)	1800	2.3 Mbps	2.3 Mbps
	Simétrico (Dois pares)	1800	4.6 Mbps	4.6 Mbps
VDSL: Very high bit-rate Digital Subscriber Line (ITU G.993.2)	Assimétrico	300	52 Mbps	12 Mbps
	Simétrico	300	26 Mbps	26 Mbps
	Assimétrico	1000	26 Mbps	3 Mbps
	Simétrico	1000	13 Mbps	13 Mbps

Tabela 2: Família de Tecnologias DSL

1.1.2 Redes de Acesso Via Fibra Óptica e Cabo Coaxial

Uma rede de acesso Híbrida Fibra Coaxial está constituída, de forma geral, por três partes principais:

1. *Elementos de rede*: dispositivos específicos para cada serviço que o operador conecta nos pontos de origem de serviço e nos pontos de acesso ao serviço.
2. *Infra-estrutura HFC*: inclui a fibra óptica e o cabo coaxial, os transmissores ópticos, os nós ópticos, os amplificadores de radiofrequência e os elementos passivos.
3. Terminal de usuário: *set top box*, modems e unidades para integrar o serviço telefônico.

Com maior largura de banda, os operadores dispõem de maior espectro para oferecer serviços que gerem benefício. Entre as vantagens deste tipo de redes HFC se incluem:

- A possibilidade de oferecer uma ampla gama de serviços tanto analógicos como digitais e suporte de serviços comutados e de difusão.
- Capacidade de adaptação dinâmica às mudanças da demanda e do mercado, devida, em grande parte, à grande flexibilidade de que estão dotadas este tipo de redes.

1.1.3 Redes de Acesso Via Fibra Óptica

A transmissão via fibra óptica oferece virtualmente largura de banda ilimitada, e é amplamente considerada como a solução fundamental para fornecer acesso de banda larga à última milha, onde se encontra principalmente o ponto de gargalo provocado pelo envio de serviços de alta velocidade, ainda que novas tecnologias como as *xDSL*, conseguiram aumentar a largura de banda disponível na infra-estrutura de cobre existente. Não obstante, precisa-se uma nova infra-estrutura de rede para suportar as novas aplicações que vão surgindo e para as que se prevêem no futuro. Esta infra-estrutura deverá permitir primeiramente mais largura de banda, rápido fornecimento de serviços, e garantias de QoS

(qualidade de serviço) a um custo efetivo e de maneira eficiente. As topologias que estendem a fibra óptica através da arquitetura de acesso de última milha são: **FTTH**: Fibra até a casa (*Fiber To The Home*), **FTTB**: Fibra até o prédio (*Fiber To The Building*), **FTTCab**: Fibra até o gabinete (*Fiber To The Cabinet*), e **FTTC**: Fibra até a calçada (*Fiber To The CURB*). Todas essas topologias oferecem um mecanismo que habilita suficiente largura de banda para o envio de novos serviços e aplicações. A tecnologia *APON* pode incluir-se em todas estas arquiteturas [1.6].

O componente principal de uma **PON** é o dispositivo divisor óptico (*splitter*) que, dependendo da direção da luz, divide o raio entrante distribuindo-lo para múltiplas fibras, ou combinando-los na direção oposta dentro de uma única fibra. Quando a PON se inclui numa arquitetura FTTH/B, a fibra vai desde a CO (central do fornecedor de serviços de telecomunicações) até um divisor óptico localizado dentro da casa do assinante ou empresa. Na arquitetura FTTCab, a fibra vai desde a CO até o divisor óptico que se localiza em um gabinete na vizinhança atendida tipicamente a uma distância aproximada de 300m do usuário. Na FTTC se chega com fibra até um gabinete mais próximo ao usuário, situado aproximadamente a 20m deste. As redes *APON* (ver seção 1.1.3.1) podem ser comuns a todas estas arquiteturas. No entanto, só nas configurações FTTH/B se eliminam todos os componentes eletrônicos ativos da planta exterior, pelo que nestas PON a rede é mais eficiente, ao eliminar todos os processos de processamento de sinal e codificação.

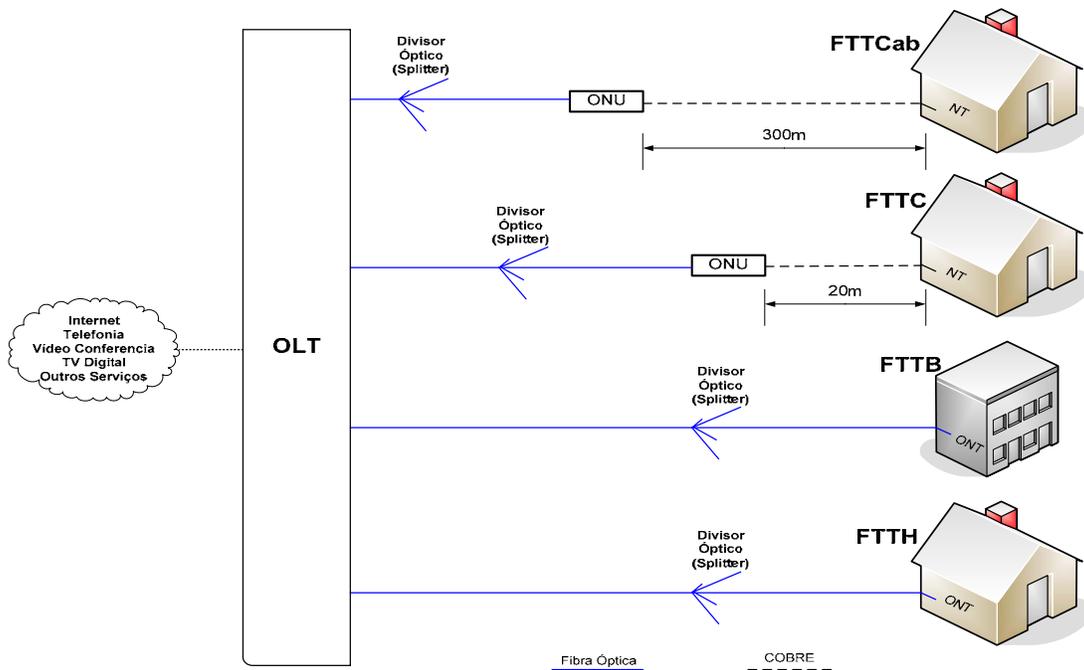


Figura 3: Redes Ópticas de Acesso

O ponto inicial do enlace se chama terminal de linha óptico **OLT**: *Optical Line Terminal* na *CO* (*Central Office*). A OLT é o nó principal da rede e é o ponto de comunicação com os outros serviços da rede oferecidos pelo provedor (rede SDH, rede ATM, rede IP, Metro Ethernet, etc.). Unicamente pode existir uma OLT por PON. O outro ponto chama-se terminal de rede óptico **ONT**: *Optical Network Terminal* no lado do cliente. O objetivo principal de este dispositivo é realizar a interface entre a rede óptica e os aparelhos do cliente. A ONT tem portas Ethernet para serviços de dados, portas E1 ou POTS (Serviço de telefonia básico) para serviços de voz e portas RF analógicas para serviços de vídeo.

1.1.3.1 Redes APON (ITU-T G.983)

Uma rede *APON* (*ATM Passive Optical Network*) está constituída fundamentalmente pela *OLT*, *ONT*, a fibra que suporta os componentes ópticos e um sistema de gestão de rede. A *OLT* reside tipicamente no escritório central, enquanto a *ONT* se localiza nas instalações do usuário. A planta externa (fibra e componentes ópticos) é totalmente passiva. Uma única fibra conecta uma porta *OLT* com múltiplas *ONTs*, utilizando filtros ópticos. Uma única *APON* pode equipar-se até com 64 *ONTs*, ainda que

tipicamente a margem seja entre 32 e 48 *ONTs*. A *OLT* pode estar até 20Km de distância das *ONTs*, permitindo cobrir uma extensa área geográfica. Uma *OLT* pode suportar múltiplas *APON*, o que, combinado com a capacidade de filtragem das *APON*, significa que uma *OLT* pode suportar um grande número de usuários.

As técnicas WDM que utilizam três comprimentos de onda diferentes permitem transmitir dados em sentido bidirecional e permitem também distribuição de vídeo na fibra. Na direção de baixada (*download*), os dados se distribuem a 1490nm, utilizando o protocolo *TDM*: Multiplexação por Divisão no Tempo (*Time Division Multiplexing*); na direção de subida (*upload*), utilizam-se 1310nm em conjunção com o protocolo *TDMA*: Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (*Time Division Multiple Access*) a fim de suportar o meio de conexão compartilhado multiponto a ponto. O terceiro comprimento de onda; 1550nm transporta a distribuição de vídeo desde a *OLT* até as *ONTs*, constituindo um método eficiente em custo para entregar um grande número de canais de vídeo analógicos e/ou digitais aos usuários. Para o transporte de comandos, controle e informação de estado se utilizam células *ATM* especiais em ambas direções. De acordo com o padrão G.983, a *APON* pode operar a duas velocidades: 155Mbps simétrico e 622Mbps descendentes (*Download*)/155Mbps ascendentes (*Upload*) assimétrico. A largura de banda pode atribuir-se individualmente às *ONT*.

Todas as *ONT* de uma *APON* recebem a difusão completa do canal de distribuição da *OLT*. Cada *ONT* supervisiona o fluxo de dados extraíndo somente as células destinadas para ele, baseando-se no valor do campo VPI/VCI da célula *ATM*, que identifica a cada *ONT* de maneira unívoca. Antes da transmissão desde a *OLT*, os dados se criptografam, mediante um processo chamado *variação*, para a segurança na *APON*. Durante a *variação* cada *ONT* transmite uma senha criptografada até a *OLT* para ser usada no processo de *variação* e assegurar que os dados destinados para essa *ONT* não estejam disponíveis para as demais. No canal de retorno, cada *ONT* só transmite dados à *OLT* depois de receber uma mensagem por parte desta, cedendo-lhe um número de ciclos de tempo (*timeslots*) na *APON*. Já que cada *ONT* pode estar a uma distância significativa das demais, e da *OLT*, utiliza-se um procedimento chamado "*ranging*" para determinar a distância entre cada *ONT* e a *OLT*, a fim de ajustar a atribuição dos ciclos e maximizar assim a eficiência da *APON*.

1.1.3.2 Redes GPON (ITU-T G.984)

São redes totalmente passivas, sem repetidores dentro da rede e sem fontes de energia intermédias, unicamente usam-se *splitters* (divisores), acopladores e atenuadores. Toda a informação é transmitida bidirecionalmente sob uma única fibra. Utilizam-se dois comprimentos de onda diferentes, uma para a informação de baixada (*downstream*) exemplo; 1490nm e uma para a informação de subida (*upstream*) (Exemplo; 1510nm). A informação no canal de distribuição (*downstream*) é transmitida em modo *broadcast*, isto é que a informação é transmitida para todos os elementos da rede. Como a informação chega a todos os usuários é necessário utilizar um sistema de criptografia para manter a privacidade das comunicações. No canal de retorno (*upstream*) a transmissão é realizada utilizando o protocolo de acesso múltiplo TDMA, onde cada elemento da rede tem um período de tempo específico para transmitir, permitindo que um mesmo canal de transmissão, neste caso o mesmo comprimento de onda, seja compartilhado por vários usuários.

As redes APON são ineficientes para o tráfego IP, o qual é o maior tráfego atualmente. Para superar estas limitações, no ano 2001, o grupo *FSAN* (*Full Service Access Network*) fez um novo esforço para especificar uma PON operando com taxas superiores a um Gigabit por segundo. Baseada nas recomendações do grupo *FSAN*, em 2003-2004, ITU-T tem aprovado o novo padrão *Gigabit-PON* (GPON) e sua série de especificações.

Estas especificações são conhecidas como recomendações ITU-T e são: G.984.1, G.984.2, G.984.3, G.984.4, G.984.5, G.984.6. No capítulo seguinte descreveremos com detalhe as redes GPON.

ITU-T	Recomendação	Especificações
G.984.1	Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Especificações Gerais	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece resumo das características essenciais • Taxas de transmissão desde 1.244/0.155 até 2.488/2.488 Gbps • 20 km Máximo alcance físico, 60 km Máximo alcance lógico
G.984.2	Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Camada PM	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece as especificações da camada PMD
G.984.3	Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Especificações da transmissão	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece as especificações da camada TC <ul style="list-style-type: none"> ➢ Modo ATM, Modo GEM, ou operação em modo dual ➢ Segurança AES
G.984.4	Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): ONT Interfase de controle e gerenciamento	<ul style="list-style-type: none"> • Fornece gerenciamento da ONT
G.984.5	Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON)	<ul style="list-style-type: none"> • Melhoramento da banda
G.984.6	Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON)	<ul style="list-style-type: none"> • Extensão

Tabela 3: Padrão GPON

1.1.3.3 EFM (IEEE 802.3ah)

Em Janeiro de 2001, o IEEE formou um grupo de estudo chamado Ethernet na primeira milha (*EFM: Ethernet in the First Mile*). O grupo definiu o objetivo de proporcionar um aumento significativo no desempenho da rede Ethernet, minimizando equipamentos, operação e custos de manutenção. Ethernet PON tornou-se uma das áreas de foco do grupo EFM [1.7].

Ethernet PON (EPON) é uma rede baseada em PON que transporta informação encapsulada em *frames* Ethernet seguindo o padrão IEEE 802.3. EPON usa um padrão de linha de codificação 8B/10B (8 bits de dados codificados em uma linha de 10 bits) e opera no padrão Ethernet a uma velocidade de 1.25Gbps. Sempre que possível EPON utiliza as atuais especificações 802.3. Incluindo a utilização do atual 802.3 *full-dúplex* no controle de acesso ao meio (MAC).

No capítulo 3 descreveremos com detalhe as redes EPON.

O grupo EFM desenvolve trabalhos nos seguintes campos:

EFM	Características
EFM sobre cobre (EFM Copper)	2BASE-TL: taxas desde 2Mbps até 5,69Mbps para uma distância máxima de 2700m
	10PASS-TS: 10Mbps para uma distancia máxima de 750m
EFM sobre Fibra (Ponto-Ponto, Fibra Monomodo)	100BASE-LX10: enlace Ethernet de 100Mbps sobre um par de fibras para uma distancia máxima de 10km
	100BASE-BX10: enlace Ethernet de 100Mbps sobre um única fibra para uma distancia máxima de 10km
	1000BASE-LX10: enlace Ethernet de 1000Mbps sobre um par de fibras para uma distancia máxima de 10km
	1000BASE-BX10: enlace Ethernet de 1000Mbps sobre um única fibra para uma distancia máxima de 10km
EFM sobre PON (EPON, Ponto-Multiponto)	1000BASE-PX10: enlace Ethernet de 1250Mbps sobre PON para uma distancia máxima de 10km
	1000BASE-PX20: enlace Ethernet de 1250Mbps sobre PON para uma distancia máxima de 20km

Tabela 4: Trabalho Desenvolvido pelo Grupo *EFM*

Nas redes EPON o canal de distribuição (*downstream*) é um meio compartilhado ponto-multiponto onde a OLT transmite por meio de *broadcast* a informação para todas as ONU.

O canal de retorno (*upstream*) nas redes EPON é conformado por enlaces ponto-ponto onde todas as *ONU* (*Optical Network Unit*: Unidade de rede óptica) transmitem em diferentes períodos de tempo para a OLT. A OLT faz o controle de assinatura dos tempos de transmissão para as ONU.

1.1.3.4 Resumo das Tecnologias APON, GPON e EPON

Características	ITU-T APON	ITU-T GPON	IEEE EPON
Taxa de bits (Mbps)	Distribuição: 622, 155 Retorno: 155	Distribuição: 2488, 1244 Retorno: 2488, 1244, 622, 155	Distribuição: 1250 Retorno: 1250
Data da padronização	1998	2003	2004
Código de Linha	NRZ	NRZ	8B/10B
Divisão máxima	1:64	1:64	1:32
Alcance máximo	20 Km	20 Km	10 Km
Protocolo básico	ATM	ATM	Ethernet
Padrões	Série ITU-T G983.x	Série ITU-T G984.x	IEEE 802.3ah
Tecnologia de acesso	TDMA	TDMA	TDMA
OAM (Operação, Administração e Manutenção)	PLOAM+OMCI	PLOAM+OMCI	Ethernet OAM
Segurança downstream	AES	AES	Não definida

Tabela 5: Características Redes APON, GPON e EPON

A tabela 5 [2.1][2.6][3.2] apresenta um breve resumo das tecnologias APON, GPON e EPON; na primeira linha temos as taxas de transmissão para o canal de *downstream* e para o canal de *upstream*. As únicas tecnologias que fornecem taxas acima de 1Gbps são GPON e EPON.

Na terceira linha temos o tipo de codificação de linha que usam as tecnologias; APON e GPON usam NRZ (*Non-Return-to-Zero*), ou seja, a voltagem não volta a zero entre bits consecutivos de valor um. EPON usa codificação de linha 8B/10B.

Temos também na tabela o alcance máximo das três tecnologias, além disso, os padrões correspondentes da ITU-T e do IEEE.

Na penúltima linha pode-se ver o serviço de OAM (Operação, Administração e Gerenciamento) nas tecnologias; APON e GPON utilizam PLOAM+OMCI, ou seja,

PLOAM (*Physical Layer Operations, Administration and Maintenance*): operações da camada física, administração e manutenção, mais OMCI (*OpenManage Client Instrumentation*): instrumentação e controle aberto para o cliente. EPON usa o OAM definido para Ethernet.

Na última linha mostra a criptografia utilizada pelas tecnologias. APON e GPON usam AES: Padrão de Criptografia Avançado (*Advanced Encryption Standard*). Para EPON ainda não se encontra definida.

1.2 Mercado das Redes GPON e EPON no Mundo

As instalações das redes PON no mundo continuam crescendo cada dia, majoritariamente no Japão (Nippon Telegraph and Telephone Corporation: NTT), Coreia (Korea Telecom) e nos Estados Unidos (Verizon) e Europa. As instalações das Redes Ópticas Passivas encontram-se divididas em dois tipos: Ethernet PON (**EPON**) no Japão e Coreia, e **GPON** nos Estados Unidos e Europa.

Na Europa e América do Norte, as empresas fornecedoras de redes tipo PON estão instalando-as agressivamente. O modelo de montagem das redes nos Estados Unidos utiliza um dispositivo externo de interface de Rede (NID) geralmente colocado fora do prédio do usuário, no Japão, Coreia e Europa a ONU tipicamente é instalada no interior do prédio do cliente.

No mundo o mercado de BPON vem perdendo gradualmente, devido à transição para redes GPON, hoje em dia, a maior parte do mercado divide-se entre EPON e GPON. GPON está ganhando mercado na Europa, Estados Unidos e no Oriente Médio. EPON domina na Ásia e Oceania oferecendo custos mais baixos.

Segundo um estudo feito pelo *FTTH Council*, atualmente 14 países possuem fração dos lares dispondo de conexão por meio de fibra acima de 1%. Entre esses 14 países, os três primeiros encontram-se na Ásia e são; Coreia do Sul, Hong Kong e Japão.

O primeiro país, Coreia do Sul, tem 31.4% dos lares conectados por fibra óptica, Hong Kong com 23.4 %, Japão com 21.3% e Suécia com 7.1%. Os outros 10 países são

Taiwan, Noruega, Dinamarca, Estados Unidos, Eslovênia, Islândia, China, Holanda, Itália e Singapura.

Na América do Norte empresas como Verizon, SBC e Bell South planejam 12 mil assinantes BPON/GPON para finais do presente ano 2008. AT&T espera ter 17 mil residências para o ano 2008 também. Na Europa países como Itália contam com 600 mil assinantes de FTTH, Dinamarca com 120 mil assinantes e Suécia com 600 mil assinantes. A região de Ásia e Oceania conta com um total de 16,6 milhões de usuários com conexão por meio de fibra óptica. Hoje em dia NTT (*Nippon Telegraph and Telephone Corporation*) supera os 10 mil assinantes de EPON e planeja ter para o ano 2010 mais de 30 mil assinantes [1.8].

Na América latina está chegando o fenômeno das redes GPON, cidades como Bogotá, São Paulo, Buenos Aires e Santiago já contam com o serviço deste tipo de redes. Na Colômbia a empresa espanhola Telefônica apresentou uma solução GPON oferecendo taxas de 10Mbps. Na Argentina também no passado 18 de Setembro de 2008 chegou ao mercado local a empresa MOTOROLA apresentando sua solução tecnológica para GPON. No Brasil também está presente a empresa PADTEC com a introdução da plataforma *FlexPad 8200* construída com base nas recomendações ITU-T G.984 (GPON), a plataforma *FlexPad 8200* é capaz de transportar serviços *triple-play* (voz, dados e vídeo) por fibra óptica em taxas de 2,5Gb/s por até 20Km de distância.

1.3 Organização do Trabalho e Motivação

A crescente demanda de novos serviços de banda larga ao assinante vem ocasionando um veloz aumento do tráfego das diversas redes de comunicações e também o aparecimento de novas tecnologias e melhoras para as redes. Tendo em vista este cenário, surgiu a proposta de trabalhar com redes PON, devido a que são redes que provavelmente serão o futuro próximo das telecomunicações.

O detalhamento do trabalho versa então sobre as redes EPON e GPON tal como estão hoje, fazendo-se, portanto uma comparação entre elas, e destacando aspectos tecnológicos. Fizemos também uma breve análise experimental de enlaces Gigabit Ethernet, a fim de aprofundar o conhecimento dos protocolos envolvidos; devido a limitações de

equipamento não foi possível implementar uma pequena rede ótica conforme inicialmente planejado. O trabalho não faz ênfase em uso da tecnologia WDM para as redes óticas, deixando aberta a possibilidade para futuros estudos.

O trabalho encontra-se estruturado da seguinte maneira.

O capítulo 1; *Introdução Geral*, trata-se de uma breve contextualização das redes de acesso atuais, sendo focalizadas principalmente as tecnologias óticas.

No capítulo 2; *Redes GPON*, serão atingidos conceitos e definições básicas dos elementos mais importantes que constituem uma rede GPON, assim como também o processo de transporte de informações nestas redes.

No capítulo 3; *Redes EPON*, serão atingidos conceitos e definições básicas dos elementos mais importantes que constituem uma rede EPON, assim como também o processo de transporte de informações nestas redes.

No capítulo 4; *Comparação entre GPON e EPON*, serão apresentadas as definições e implementações na obtenção dos resultados deste trabalho, além de uma análise comparativo custo-benefício entre as redes GPON e EPON.

E finalmente, no capítulo 5; *Conclusão* será feita uma conclusão geral de todo o trabalho e também sugestão de trabalhos futuros.

Os Anexos deste trabalho foram disponibilizados após a Conclusão.

1.4 Principais Contribuições deste Trabalho

O presente trabalho contribuiu para o esclarecimento de situações concorrentes de GPON e EPON, e apresentou algumas soluções originais ao tema.

Entre elas destacamos:

- Um estudo e análise atualizada e comparativa dos novos padrões GPON e EPON desde o ponto de vista tecno-econômico.
- Argumentos válidos para que no momento de planejar uma rede, decidir se desenvolver uma plataforma GPON ou EPON.

- Estudos experimentais em nosso trabalho que abrem o caminho para o investimento de equipamento para futuras pesquisas, aproveitando a conexão com a rede KYATERA que temos no laboratório.

Além disso, temos artigos originais, acerca dos métodos, experimentos e resultados obtidos, que serão alvo de publicações, em preparação e que serão submetidos a eventos num futuro próximo.

1.5 Referências

- [1.1] S. C. Grady, *The book on FTTX From Design To Deployment: A Practical Guide To FTTX Infrastructure*. ADC Telecommunications INC, 2005.
- [1.2] A. S. Tanenbaum, *Redes de Computadores*. Editora Campus, Tradução da 3º ed.
- [1.3] W. T. Ooi, M. C. Chan, A. Ananda, R. Shorey, *Mobile, Wireless, and Sensor Networks*, Editora John Wiley & Sons, Ltd, 2006
- [1.4] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, *Optical Networks: Practical Perspective*, Morgan Kaufmann Publisher, 2002.
- [1.5] G.T. Hawley, “Systems considerations for the use of xDSL technology for data access”, *IEEE Communications Letters Magazine*, vol. 35, issue 3, Março 1997.
- [1.6] C. Lin, *Broadband optical Access Networks and Fiber-to-the-Home*. Editora John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [1.7] G. Kramer, *Ethernet Passive Optical Networks*. Editora Mac Graw Hill, 2005.
- [1.8] *FTTH Council* Home Page: www.ftthcouncil.org

2. REDES GPON

A ITU-T (*International Telecommunications Union – Telecommunication sector*) começou a trabalhar no padrão GPON no ano 2002. A principal motivação de GPON era fornecer maior largura de banda, maior eficiência de transporte para serviços IP, e uma especificação completa e adequada para oferecer todo tipo de serviços. GPON está padronizada no conjunto de recomendações ITU-T G.984.x ($x = 1, 2, 3, 4, 5, 6$). As primeiras recomendações apareceram durante o ano 2003 e 2004, tendo contínuas atualizações nos anos posteriores. Ainda que muita da funcionalidade que não está relacionada com GPON se conserva com respeito as suas tecnologias passadas, principalmente BPON. GPON baseia-se numa camada de transmissão completamente nova.

GPON proporciona uma estrutura de *frame* escalável de 622Mbps até 2,5Gbps, assim como suporte de taxas de bit assimétricas. A velocidade mais utilizada pelos atuais fornecedores de equipas GPON é de 2,488 Gbps no sentido *downstream* e de 1,244 Gbps no sentido *upstream*. Sobre certas configurações se podem proporcionar até 100Mbps por cliente [2.1].

A rede de acesso é a parte da rede do operador mais próxima ao usuário final, pelo que se caracteriza pela abundância de protocolos e serviços. O método de encapsulamento da informação que utiliza GPON é chamado: GEM (*GPON Encapsulation Method*) que permite suportar qualquer tipo de serviço (Por exemplo: Ethernet, TDM, ATM) em um protocolo de transporte síncrono baseado em *frames* periódicos de 125 μ s. GEM se baseia no padrão GFP (*Generic Framing Procedure*) do ITU-T G.7041, com modificações menores para as tecnologias PON. GPON deste modo, não só oferece maior largura de

banda do que suas tecnologias passadas, além disso, é mais eficiente e permite aos operadores continuar oferecendo seus serviços tradicionais (voz baseada em TDM, linhas alugadas) sem ter que mudar as equipes instaladas nas dependências de seus clientes. Na seção 2.7 vai se mostrar com mais detalhe o padrão GFP.

Ademais, GPON implementa capacidades de OAM (*Operation Administration and Maintenance*) avançadas, oferecendo uma potente gestão do serviço extremo a extremo. Entre outras funcionalidades incorporadas cabe destacar: monitoração da taxa de erro, alarmes e eventos, processo de descobrimento e *ranging* automático.

Neste capítulo, portanto, abordam-se definições específicas, parâmetros e variáveis relevantes para as redes GPON.

2.1 Arquitetura da Rede Óptica de Acesso

A seção óptica da rede local de acesso pode ser ativa ou passiva e sua arquitetura pode ser ponto-multiponto ou ponto-ponto. A Figura 4 mostra as arquiteturas consideradas na recomendação ITU-T G.984.1.

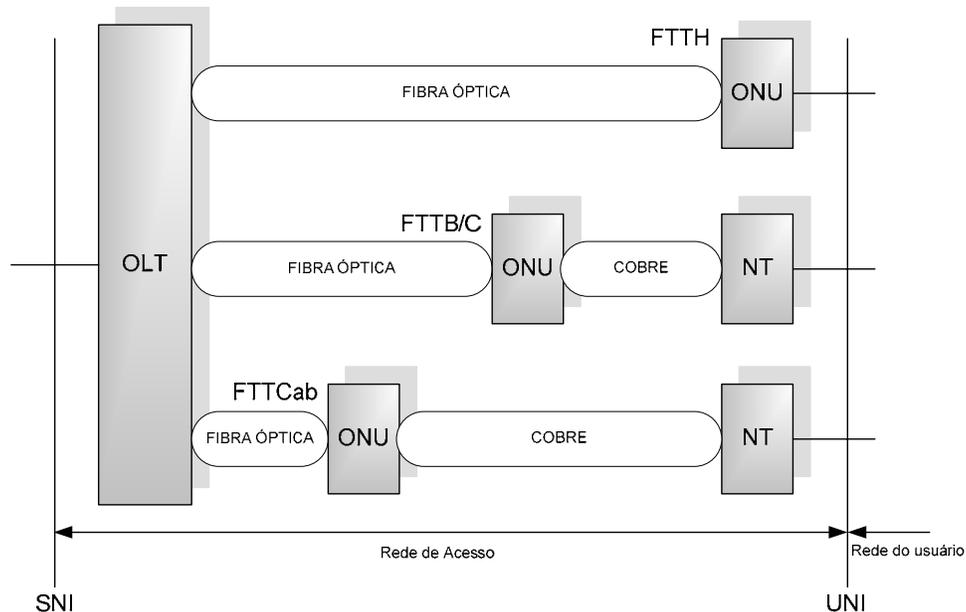


Figura 4: Arquitetura da Rede

Na figura anterior temos duas interfaces: a interface UNI e a interface SNI.

A UNI (*User Network Interface*) define a interface física e as especificações do protocolo para dispositivos que estão conectados nos extremos das redes ATM. Isto inclui sistemas de usuários que estão conectados a um *switch* privado ATM, ou a conexão entre um *switch* privado ATM e um *switch* ATM da rede pública [2.2]. A SNI (*Service Node Interface*) é a interface da rede de óptica de acesso (OAN) para a rede básica, através de uma rede de óptica passiva (PON) [2.3].

A recomendação G.984.1 apresenta a seguinte configuração de referência:

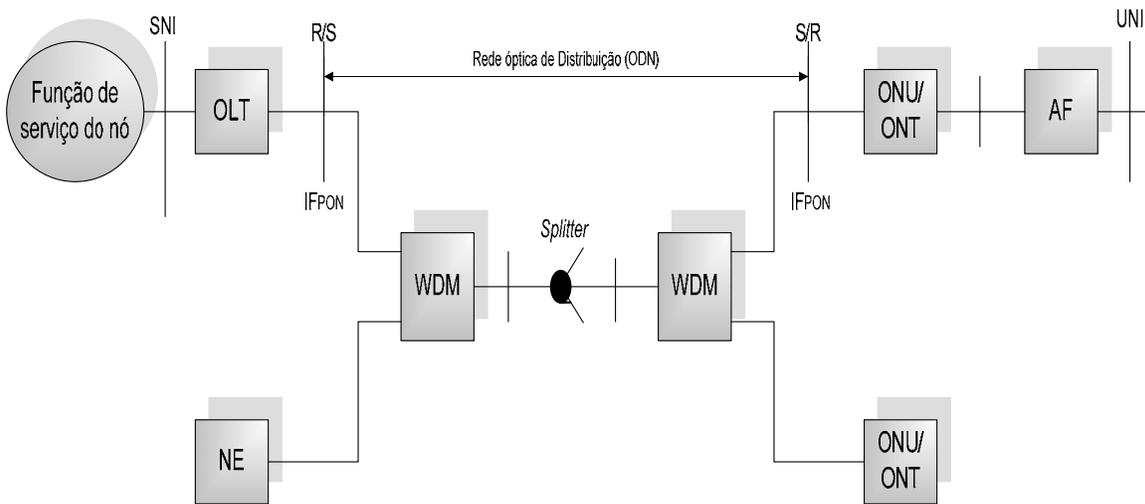


Figura 5: Configuração de Referência para GPON (G.984.1)

A Figura 5 especifica a configuração para uma rede GPON. Os módulos de WDM (*Wavelength Division Multiplex Module*) se não vão ser usados, não é necessário colocá-los. O módulo NE (*Network Element*) usa os diferentes comprimentos de onda desde a OLT e a ONU. O módulo AF se denomina função de adaptação (*Adaptation Function*); é um dispositivo adicional para mudar a interface do assinante ONT/ONU para a interface UNI requerida pelo operador ou para mudar a interface UNI para a interface do cliente ONT/ONU. AF também se usa para mudar a interface de rede da OLT para a interface SNI requerida pelo operador ou para mudar a interface SNI para a interface de rede OLT. Algumas vezes o módulo AF está incluído na ONU.

S é um ponto na fibra que se encontra depois do ponto de conexão óptico da OLT no sentido de baixada (*downstream*) e da ONU no sentido de subida (*upstream*). Por

exemplo, um conector óptico ou um *splitter* óptico. R é um ponto na fibra que está justo antes do ponto de conexão óptico da ONU no sentido de baixada (*downstream*) e da OLT no sentido de subida (*upstream*) Por exemplo, um conector óptico ou um *splitter* óptico.

A interface nos pontos de referência R/S e S/R se define como IF_{PON} , isto é uma interface específica das redes PON que suporta todos os elementos do protocolo necessários para permitir a transmissão entre a OLT e as ONU.

GPON se conhece por sua habilidade de suportar múltiplos e novos serviços que estão aparecendo para os clientes residências e para as pequenas empresas, devido à alta capacidade da rede.

2.2 Conceitos Gerais sobre GPON

Basicamente GPON aponta as velocidades de transmissão maiores ou iguais a 1,2 Gbps. No caso de FTTH ou FTTC que usam xDSL assimétrico, aquela elevada taxa de *upstream* não é necessária. GPON considera 7 combinações de velocidades e são as seguintes:

- 155 Mbps (*Upstream*), 1,2 Gbps (*Downstream*).
- 622 Mbps (*Upstream*), 1,2 Gbps (*Downstream*).
- 1,2 Gbps (*Upstream*), 1,2 Gbps (*Downstream*).
- 155 Mbps (*Upstream*), 2,4 Gbps (*Downstream*).
- 622 Mbps (*Upstream*), 2,4 Gbps (*Downstream*).
- 1,2 Gbps (*Upstream*), 2,4 Gbps (*Downstream*).
- 2,4 Gbps (*Upstream*), 2,4 Gbps (*Downstream*).

O padrão GPON G.984 define o alcance lógico e o alcance físico. O alcance lógico da rede é a máxima distância entre a ONU/ONT e a OLT desprezando as limitações da camada física. Na GPON o alcance lógico máximo é de 60Km. O alcance físico é a máxima distância física entre a ONU/ONT e a OLT. GPON tem definido duas opções definidas para o alcance físico: 10Km e 20Km. Estabelece-se que 10Km é a máxima distância onde pode ser usado um FP-LD (*Fabry Perot-Laser Diode*) na ONU para altas taxas de transmissão como 1,25 Gbps.

A rede GPON pode ser demultiplexada até para 64 usuários, o que se converte em um aspecto muito atrativo para os operadores. Para o futuro próximo se espera chegar até 128 usuários usando a mesma OLT.

Desde o ponto de vista da administração da rede de acesso, a proteção na GPON é considerada como uma melhora na fiabilidade da rede. No entanto, a proteção deve ser considerada como um mecanismo opcional porque sua implementação depende do planejamento econômico do sistema. A recomendação G.984.1 apresenta várias formas possíveis para uma configuração *dúplex*. Existem dois tipos de proteção os quais são:

- Chaveamento forçado.
- Chaveamento automático.

O chaveamento forçado é ativado por eventos da administração da rede, como substituição da fibra, re-encaminhamento da fibra, entre outras. O chaveamento automático é acionado por detecção de falhas; como perda do sinal, perda do *frame*, degradação do sinal, entre outros. Ambos tipos de proteção são possíveis na rede GPON, ainda que são funções opcionais. O mecanismo de chaveamento é realizado geralmente pela função OAM (*Operation, Administration and Maintenance*), portanto, o campo de informação OAM necessário, deve ser reservado no *frame* OAM.

A Figura 6 mostra o modelo *dúplex* para a rede de acesso. A parte mais importante da proteção na GPON dever ser a seção entre a interface ODN (*Optical Distribution Network*) na OLT e a interface ODN na ONU via a ODN, excluindo a redundância SNI na OLT.

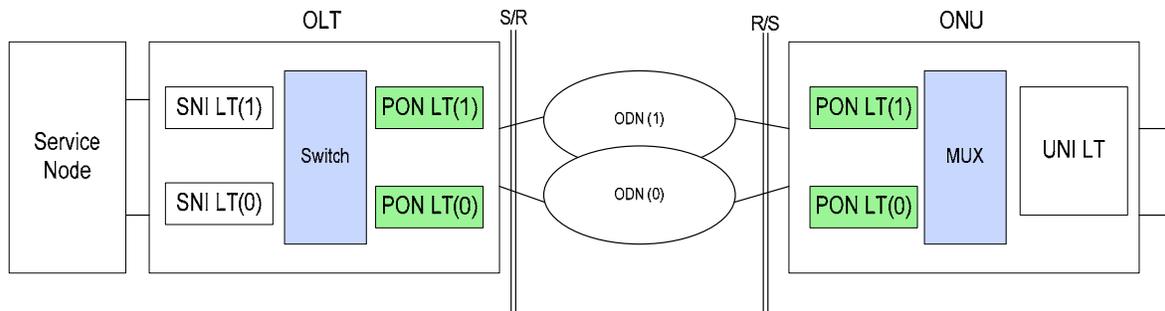


Figura 6: Modelo *Dúplex* G.984.1

2.2.1 Possíveis Configurações *Dúplex* para GPON

Podem existir diferentes tipos de configurações para GPON, onde cada uma poderia ter um protocolo de controle distinto. A recomendação G.984.1 apresenta os seguintes 4 exemplos.

Na Figura 7 temos a primeira configuração, onde somente se duplica a fibra. Nesse caso o sinal perdido ou os *frames* perdidos são inevitáveis no período de chaveamento.

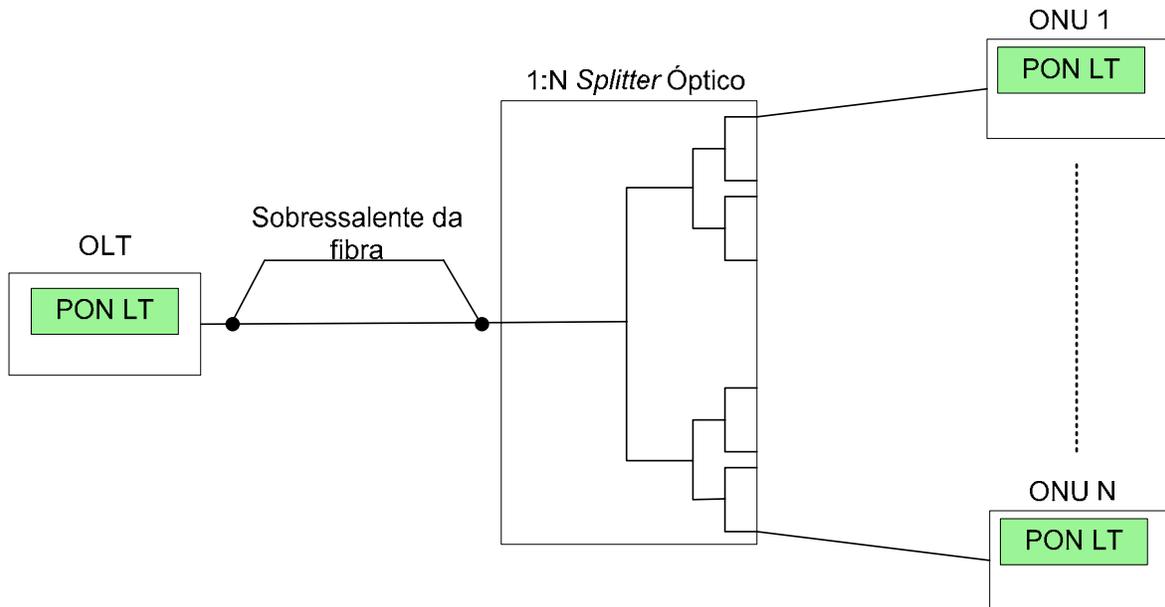


Figura 7: Sistema GPON *Dúplex*: Sistema *Dúplex* de Fibra

Na Figura 8 duplica-se a OLT e a fibra óptica entre as OLT e o *splitter* óptico. O *splitter* tem duas portas de entrada/saída do lado da OLT. Nesse caso o sinal perdido ou os *frames* perdidos são inevitáveis no período de chaveamento.

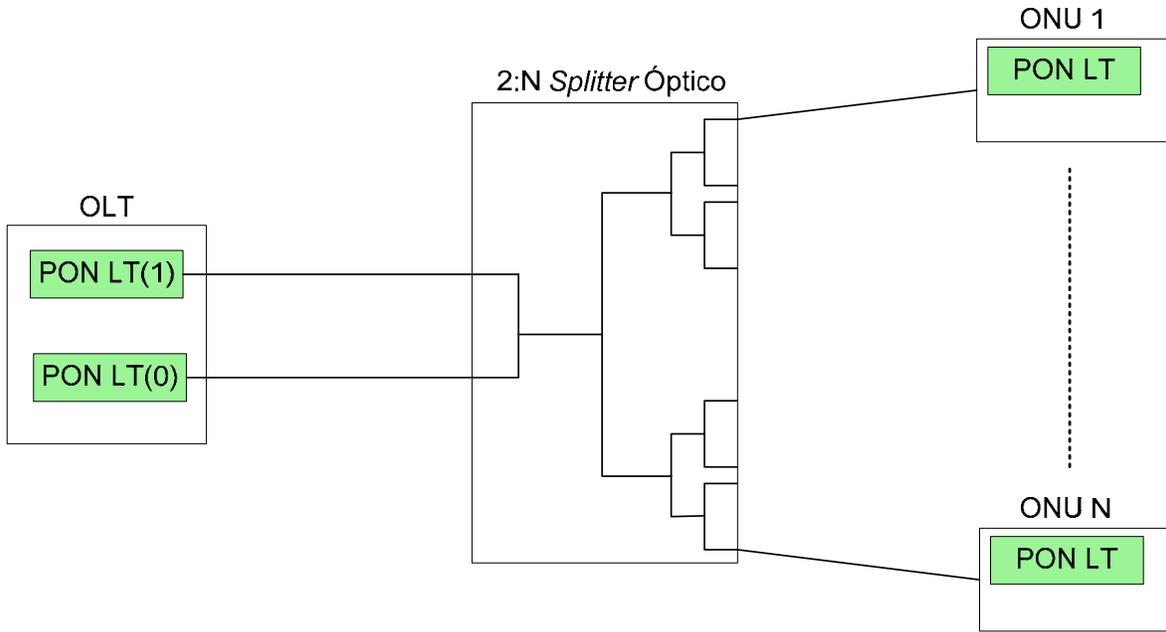


Figura 8: Sistema GPON *Dúplex*: Sistema *Dúplex* de OLT

Na Figura 9 duplica-se a OLT e a ONU. Usando essa configuração, a recuperação por falhas é possível em qualquer ponto. No entanto, os custos da rede são elevados.

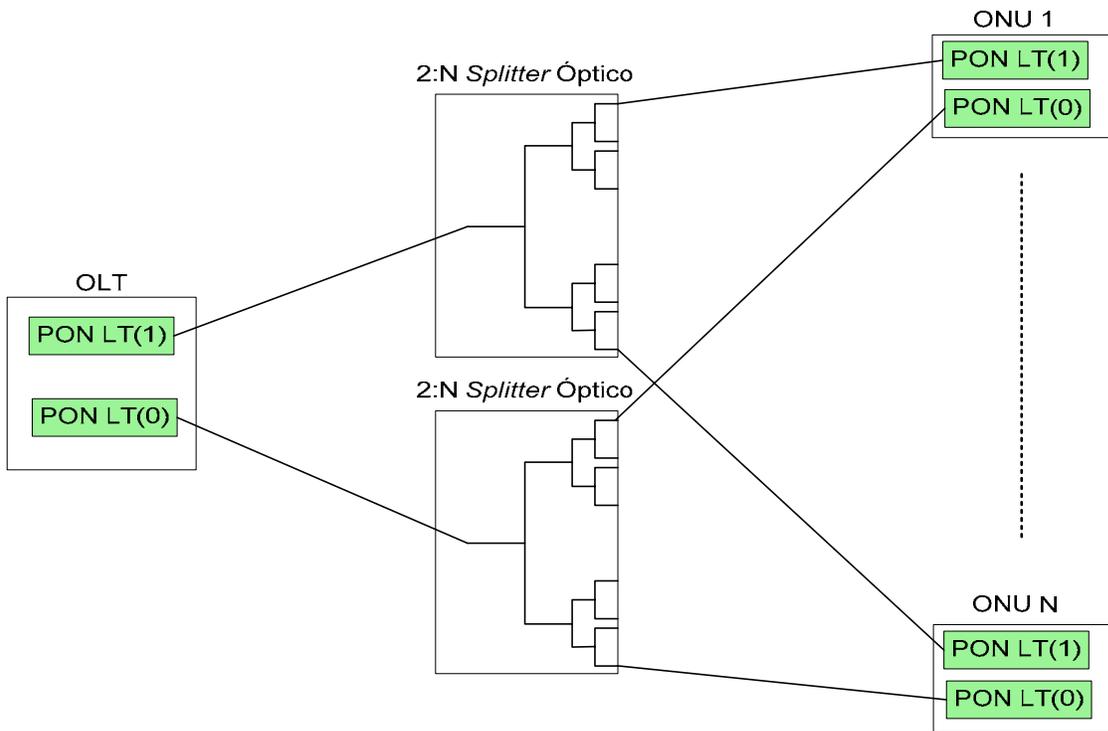


Figura 9: Sistema GPON *Dúplex*: Sistema *Full Duplex*

Se as ONU já se encontram instaladas nos prédios dos usuários, o cabo instalado pode ser ou não *duplexed*. Adicionalmente se cada ONU pertence a um diferente usuário, a fiabilidade vai depender de cada cliente e somente um número limitado de ONU poderiam ter uma configuração *dúplex*. Baseado no anterior, a configuração que mostra a Figura 10 permite um *duplexing* parcial do lado da ONU.

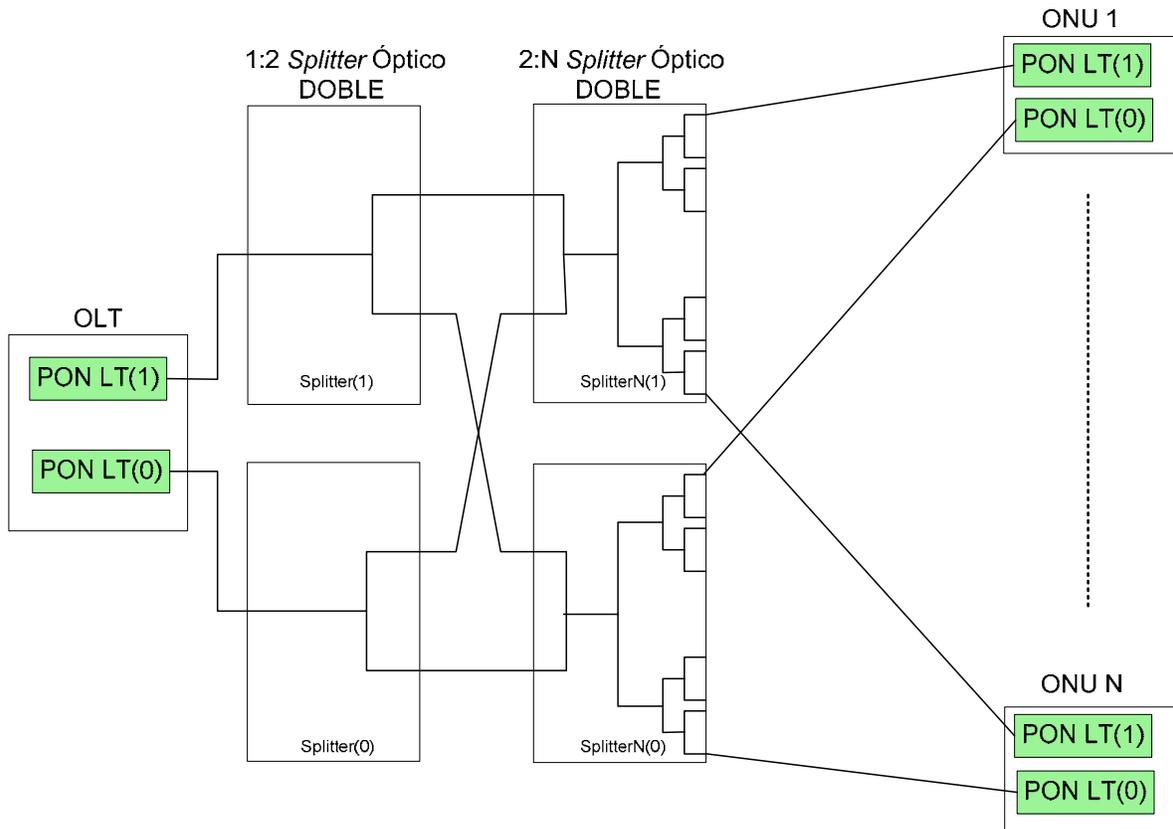


Figura 10: Sistema GPON *Dúplex*: Sistema Parcial *Dúplex*

Devido à natureza *multicast* de PON, GPON precisa de um mecanismo de segurança que adapte os seguintes requisitos:

- Evitar que outros usuários decodifiquem os dados facilmente na direção de *downstream*;
- Evitar que outros usuários aparecessem como outra ONU / ONT.
- Permitir uma implementação custo-efetiva razoável.

2.3 Especificações da Subcamada PMD (*Physical Medium Dependent*)

A recomendação ITU-T G.984.2 foi aprovada o dia 16 de março de 2003 e se focaliza nos serviços de suporte de rede com requisitos de largura de banda, tais como serviços de voz até serviços de dados com taxas de velocidades de Gigabits por segundo. Também se propõem os requisitos e especificações da camada física para a subcamada PMD de uma rede óptica passiva com capacidade de Gigabits.

A subcamada PMD se encarrega do acesso ao meio físico (da transmissão dos bits de uma forma correta entre os nós da rede). A PMD é dependente do modo de transmissão que se utilize.

2.3.1 Requisitos da Subcamada PMD para GPON

As taxas de transmissão padronizadas na GPON são valores múltiplos de 8KHz. No item 2.2 estão especificadas as velocidades. A recomendação ITU-T G.984.2 usa fibras ITU-T G.652; também conhecida como padrão SMF[2.4]. Esta fibra tem uma simples estrutura de índice degrau e é otimizada para operar na banda de 1.310nm, possui um comprimento de onda de dispersão zero em 1.310nm e pode operar também na banda de 1.550nm, também possui uma típica dispersão cromática em 1.550nm é alta em 17ps/nm*Km. O parâmetro de atenuação para a fibra G.652 é tipicamente de 0,2dB/Km em 1.550nm, e o parâmetro PMD é menor que 0,1ps/Km. As fibras G.652 (Fibra de Dispersão Não Deslocada com Baixo Pico d'água) não são otimizadas para aplicações WDM devido à alta atenuação ao redor da região do pico de água. A convencional SMF tem um comprimento de onda com zero de dispersão que fica próximo à banda de 1.310nm. SMF mostra altos valores de dispersão sobre a faixa entre 1.500nm e 1.600nm (terceira janela de banda).

A transmissão bidirecional é realizada usando tecnologia WDM em uma única fibra ou transmissão unidirecional usando duas fibras.

No sentido descendente (*downstream*) a taxa de velocidade desde a OLT até a ONU é de 1244,16 ou 2488,32Mbps. O intervalo de comprimentos de ondas utilizado na direção

descendente nos sistemas de uma única fibra vai desde 1480nm até 1500nm. Para sistemas de duas fibras vai desde 1260nm até 1360nm.

No sentido ascendente (*upstream*) a taxa de velocidade desde a ONU até a OLT é de 155, 622, 1244 ou 2488Mbps. Quando se encontra em um dos estados do funcionamento e é autorizada, a ONU transmite o sinal com uma precisão igual a do sinal descendente recebida. No sentido ascendente o intervalo de comprimentos de ondas utilizado vai desde 1260nm até 1360nm [2.5].

Tanto no sentido ascendente como descendente, se usa codificação NRZ (Non Return to Zero). O convenio utilizado para o nível lógico é o seguinte: um alto nível de emissão de luz para transmitir um 1 binário e um baixo nível de emissão luz para transmitir um 0 binário.

2.3.2 Interação entre a Subcamada PMD da GPON e a Subcamada TC

A subcamada TC (*Transmission Convergence*) tem como função a extração de informação contida desde a camada física. Isto inclui a geração e a revisão do HEC (*Header Error Control*) extraindo células desde o fluxo de bits primeiramente e o processamento de células "*idles*", também o reconhecimento do limite dela. Outra função importante é trocar informação de operação e gerenciamento (OAM) com o planejamento administrativo [2.6]. Algumas das funções da GPON pertencem as duas subcamadas; PMD e TC ou tem repercussão nas duas. Alguns sistemas usam FEC (*Forward Error Correction*) para a correção de erros na recepção, em GPON define-se G como o ganho óptico efetivo que é a diferença entre a potência óptica na entrada do receptor usando ou não FEC, para uma BER (*Bit Error Rate*) de 1×10^{-10} . Os sistemas que utilizam FEC com um ganho óptico efetivo G(dB), podem usar as seguintes duas variantes de desempenho:

- A potência mínima e a máxima do transmissor podem ser reduzidas ao valor de G;
- A sensibilidade mínima do receptor pode diminuir até o valor de G;

Alternativamente, tendo o mesmo desempenho dos transmissores e dos receptores, pode-se utilizar o ganho G de codificação óptica efetiva para lograr um alcance físico maior

ou uma relação de divisão mais alta (*split ratio*) usando-se um LASER MLM (*Multiple Longitudinal Mode Laser*) na ONU. Nesse caso usa-se FEC para reduzir a penalização devida ao ruído de partição de modo (MPN, *mode partition noise*). A FEC se implementa na subcamada TC, o ganho da FEC não desvia a especificação de sobrecarga no receptor.

Os requisitos do receptor na OLT implicam o uso de implementações baseadas no fotodiodo avalanche (APD; *Avalanche PhotoDiode*) a taxas de 1244,16 Mbps e superiores. Os receptores devem ter uma boa sensibilidade e uma ampla margem dinâmica para a recepção no modo *burst* a taxas de bits altas. Para flexibilizar essa margem dinâmica no receptor da OLT, precisa-se reduzir o nível de potência de transmissão das ONU com baixas perdas na ODN (*Optical Distribution Network*), com o objetivo de evitar sobrecarregar o receptor na OLT. Devido a isto, a GPON implementa um mecanismo apropriado de potência.

Este mecanismo requer funcionalidades que pertencem à subcamada TC, como a capacidade da ONU para aumentar ou diminuir a potência transmitida por meio de mensagens que envia a OLT no sentido descendente (*downstream*).

- Para a potência de saída na ONU existem três modos. A PMD pode-se controlar localmente para que funcione em qualquer modo. Os modos são os seguintes:

MODO 0: Normal (Potência mínima: -7dBm, Potência máxima: -2dBm)

MODO 1: Baixo 1 = Normal -3dB

MODO 2: Baixo 2 = Normal -6dB

- A OLT mede a potência óptica média P , de cada burst proveniente da ONU. A OLT compara essa medição com um ou dois umbrais (TL; umbral baixo e TH; umbral alto) e emite uma das seguintes indicações (O intervalo de incerteza na comparação de umbrais deve ser no máximo de 4 dB):

$P > TH$: indicação de potência alta

$P < TL$: indicação de potência baixa

$TL < P < TH$: indicação de potência correta

- O receptor da OLT deve conseguir medir a potência do *burst* com uma sensibilidade de -5dB

As vantagens do mecanismo de nivelção de potência são as seguintes:

- A diminuição do requisito da margem dinâmica do receptor na OLT, devido a que uma ONU com perdas baixas de ODN configura-se com uma potência de transmissão baixa.
- O incremento da vida útil do LASER e a redução do consumo de potência quando a ONU funciona em modo de potência baixa.

O mecanismo de nivelção de potência permite suavizar os requisitos do receptor na ONU.

2.4 Frame de Dados no Canal de Distribuição (*Downstream*)

Na direção de baixada (*downstream*), um *frame* tem uma duração constante de 125µs para os sistemas de 1.24416 Gb/s e 2.48832 Gb/s, além disso, tem um comprimento de 19440 bytes e 38880 bytes respectivamente (ver Figura 11).

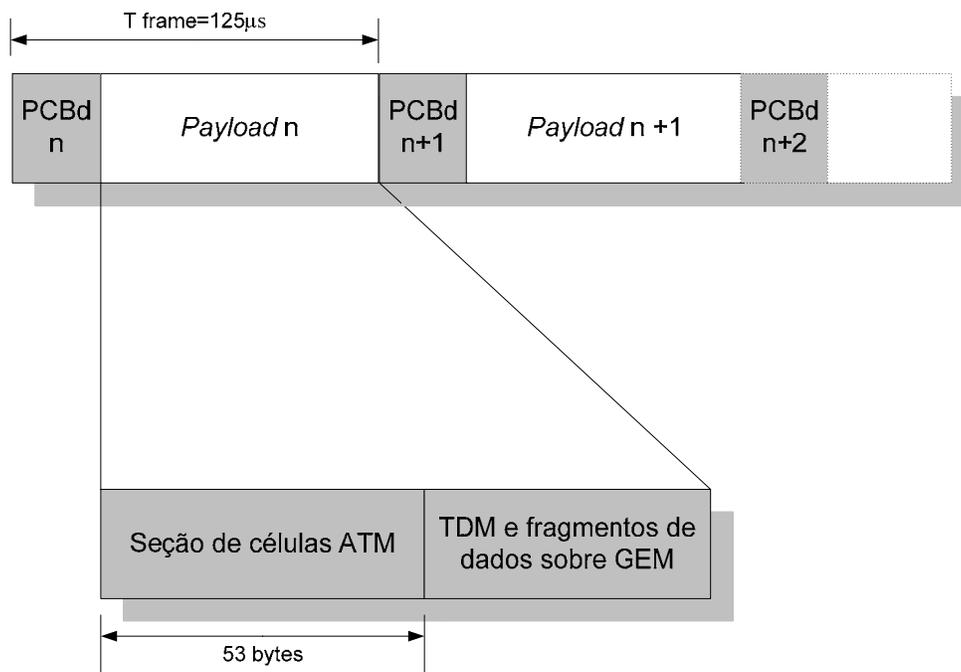


Figura 11: Frame de *downstream*: GPON

O bloco de controle físico (PCBd: *Physical Control Block for downstream*) para um canal de distribuição contém vários campos e é transmitido para todas as ONU na GPON em forma de *broadcast*. Deste modo cada ONU recebe o PCBd e opera segundo à informação contéuda no campo. O campo PCBd está conformado da seguinte forma(ver Figura 12):

- Sincronização física (Psync): comprimento de 32 bits.
- Campo de identificação (Ident): comprimento de 32 bits.
- Campo de operação, administração e gerenciamento da camada física na direção de *downstream* (PLOAMd). Contém uma mensagem PLOAM: comprimento 13 bytes.
- Campo do código de paridade (BIP: *Bit Inter-leaved Parity*): comprimento 8 bits.
- Campo Plend: comprimento 32 bits.
- Campo do mapa de largura de banda (BW *map*). Contém um arranjo de estruturas de 8 bytes, representando a simples alocação de largura de banda para uma ONU em particular na GPON.

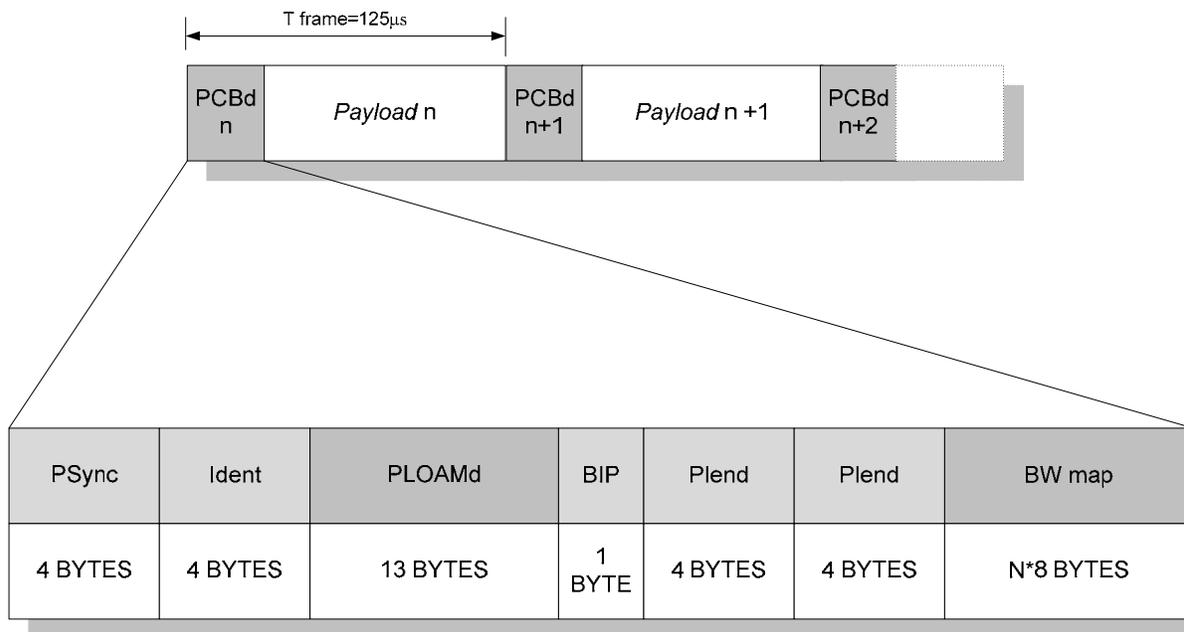


Figura 12: Bloco de Controle PCBd

2.5 Frame de Dados no Canal de Retorno (*Upstream*)

Na direção de *upstream* um *frame* tem uma duração constante de $125\mu\text{s}$ para os sistemas de 1.24416 Gb/s e 2.48832 Gb/s, além disso, tem um comprimento de 19440 bytes e 38880 bytes respectivamente. As transmissões no canal de retorno consistem em uma série de *frames* individuais originados pelas ONU na GPON. Cada rajada contém o cabeçalho da camada física (PLOu: *Physical Layer Overhead of upstream*), e adicional ao *payload* do cliente, contém um campo opcional de PLOAM *upstream* (PLOAMu), também tem um campo de seqüência de nivelador de potência de *upstream* (PLSu) e um campo de reporte dinâmico de largura de banda (DBRu).



Figura 13: *Frame* de Dados GPON no Canal de Retorno

O *frame* de *upstream* tem uma duração de $125\mu\text{s}$ igualando a duração do *frame* de *download*. Cada *frame* contém um número arbitrário de transmissões de uma ou mais ONU, os *frames* são organizados de certa forma definida pelo campo BWmap. Durante cada período de alocação de transmissão, a ONU pode transmitir um *frame* de dados de usuário ou enviar os campos de controle mencionados anteriormente (Ver Figura 13).

- PLOu: campo de comprimento variável, dependendo da locação da ONU.
- PLOAMu: campo de 13 bytes de comprimento.
- PLSu: campo opcional, de 120 bytes de comprimento.
- DBRu: campo de comprimento variável, dependendo da alocação dinâmica de largura de banda de GPON (DBA) e do número de *CONTainers* (*TCON*) de translação por cada ONU.

A OLT indica através de bandeiras no campo BWmap se os campo opcionais PLOAMu, PLSu ou DBRu deveriam ser enviados e em que alocação de banda. A planificação na OLT precisa ter em conta a demanda de largura de banda e a latência de esses campos auxiliares no momento de estabelecer a frequência de suas transmissões.

2.6 Alocação do Tempo do Cabeçalho da Camada Física

O tempo do cabeçalho da camada física (T_{plo}) é utilizado para alocar 5 processos físicos na GPON: tempo de ativação/desativação do LASER, tolerância de deslocamento da temporização, recuperação de nível, recuperação do relógio e início da delimitação do *burst*. O T_{plo} pode-se dividir em três seções: tempo de guarda (T_g), tempo de preâmbulo (T_p) e tempo delimitador (T_d). Durante T_g , a ONT não transmitirá mais potência que o zero nominal, durante T_p a ONT transmitirá um preâmbulo padrão que fornece a máxima densidade de transição para as funções de recuperação rápido de nível e de relógio. Finalmente, durante T_d a ONU transmitirá um padrão de dados especial com propriedades de autocorrelação que permitem à OLT encontrar o início da rajada de bits.

A incerteza de temporização total pico a pico (T_u ; *timing uncertainty*) é um parâmetro adicional da lógica de controle da PON. Essa incerteza surge devido as variações da fibra e dos componentes com a temperatura e outros fatores ambientais.

As inequações de restrição que deve cumprir a OLT são as seguintes [2.6]:

$$T_g > T_{on} + T_u \quad (2.1)$$

$$T_g > T_{off} + T_u \quad (2.2)$$

T_d deve fornecer suficientes bits de dados para que a função delimitadora seja robusta ante os erros de bits. A resistência do delimitador aos erros depende da implementação exata do dispositivo de correlação do padrão, mas uma simples aproximação entre o número de bits no delimitador (N) e o número de bits errados tolerados (E) é a seguinte [2.6]:

$$E = \text{int} \left(\frac{N}{4} \right) - 1 \quad (2.3)$$

A passada equação tem sido verificada empiricamente mediante a busca numérica de todos os delimitadores com tamanho entre 8 e 20 bits. Esta busca foi supondo que o preâmbulo ajustava-se a um padrão repetitivo “1010” e que o delimitador tinha um número igual de zeros e uns.

Para uma certa taxa de erro de bit (BER), a probabilidade de uma rajada com erros graves está dada por [2.6]:

$$P_{seb} = \left(\frac{N}{E + 1} \right) BER^{E+1} \quad (2.4)$$

Substituindo a equação 2.3 na equação 2.4 obtemos [2.6]:

$$P_{seb} = \left(\frac{N}{\text{int}(N/4)} \right) BER^{\text{int}(n/4)} \quad (2.5)$$

Se BER é igual a 1×10^{-4} , a P_{seb} resultante para diversos comprimentos N do delimitador se mostra na Tabela 6:

N	Pseb
8	$2,8 \times 10^{-7}$
12	$2,2 \times 10^{-10}$
16	$1,8 \times 10^{-13}$
20	$1,5 \times 10^{-16}$

Tabela 6: Probabilidade de uma Rajada com Erros Graves em Função do Comprimento do Delimitador G.984.2

Pode-se observar na tabela anterior que para suprimir este tipo de erro, o comprimento do delimitador deve ser pelo menos de 16 bits.

Usando estas considerações a seguinte tabela mostra as alocações recomendadas do cabeçalho da camada física. A tabela mostra também os valores normativos dos tempos de ativação e desativação do transmissor ONT, e o tempo total do cabeçalho da camada física.

Taxa de transmissão <i>Upstream</i> (Mbps)	Ativação do transmissor (bits)	Desativação do transmissor (bits)	Tempo total (bits)	Tempo de guarda (bits)	Tempo de preâmbulo (bits)	Tempo do delimitador (bits)
155,52	2	2	32	6	10	16
622,08	8	8	64	16	28	20
1244,16	16	16	96	32	44	20
2488,32	32	32	192	64	108	20
Notas	Máximo	Máximo	Obrigatório	Mínimo	Sugerido	Sugerido

Tabela 7: Alocações Sugeridas de Tempo do cabeçalho

2.7 GFP: *Generic Framing Procedure*

Generic Framing Procedure (GFP) [2.7] é uma técnica de multiplexação definida pela recomendação ITU-T G.7041. Existem dois modos de GFP: *Generic Framing Procedure - Framed* (GFP-F) e *Generic Framing Procedure - Transparent* (GFP-T):

GFP-F: mapeia cada *frame* do cliente em um único *frame* chamado GFP. GFP-F é utilizado quando o sinal do cliente é conformado em *frames* ou pacotes pelo protocolo do cliente. Este modo encapsula *frames* completos de Ethernet com um cabeçalho GFP.

GFP-T: permite o mapeamento de múltiplos códigos de bloco 8B/10B em um código de bloco eficiente 64B/65B para o transporte de um *frame* GFP. Este modo é utilizado para transporte de sinais tais como *Gigabit Ethernet*, *Fibre Channel*, *ESCON*, *FICON*, e *Digital Video Broadcast* (DVB). Neste modo, pequenos grupos de símbolos 8B/10B são transmitidos em lugar de esperar uma completa estrutura de dados.

Existem dois tipos de *frames* GFP: um *frame* GFP cliente e o *frame* de controle GFP. Um *frame* GFP cliente ainda pode ser classificado como um *frame* de dados do cliente ou um *frame* de gestão do cliente. O primeiro é utilizado para o transporte de dados do cliente, enquanto o último é utilizado para o transporte ponto a ponto da gestão da informação como a perda do sinal entre outros. Os *frames* de gestão do cliente podem ser

diferenciados dos *frames* GFP cliente baseado no tipo de indicador de carga útil (*payload*). O *frame* de controle GFP consiste somente de um campo de cabeçalho sem carga útil. Este *frame* de controle é utilizado para compensar as lacunas entre o sinal do cliente onde o meio de transporte tem maior capacidade que o sinal, isto é mais conhecido como um *frame* ocioso “*idle*”.

O formato do *frame* GFP consiste em: um núcleo de cabeçalho, cabeçalho de carga útil, extensão de cabeçalho (opcional), carga útil GFP (*payload*) e um *frame* opcional de verificação de seqüência (FCS).

2.7.1 Modo de Encapsulamento de informação GPON (GEM)

O modo de encapsulamento GPON (GEM: *GPON Encapsulation Mode*) permite maior flexibilidade e transmissão de pacotes IP de tamanho variável ao longo dos enlaces TDM. O cabeçalho do padrão GEM é ilustrado na Figura 14 e contém os seguintes campos:

- Campo PLI, indicador do comprimento do *payload* (*Payload Length Indicator*). Tem um comprimento de 12 bits e contém a extensão do *payload* após o cabeçalho
- Campo PORT ID (Identificação da Porta), usa-se para fornecer 4096 indicadores únicos de tráfego, permitindo eficiência na multiplexação do tráfego.
- Campo PTI (tipo de conteúdo), indica que tipo de dados são transmitidos no *frame* GEM, definindo seu tratamento. Este campo tem 3 bits de comprimento.
- Campo HEC (proteção de erro de código), tem um comprimento de 13 bits e é uma combinação do código BCH(39,12,2) e um simples bit de paridade.

PLI	Port ID	PTI	HEC	Fragment Payload
12 Bits	12 Bits	3 Bits	13 Bits	L Bytes

Figura 14: Cabeçalho do *Frame* GEM

2.8 Referências

- [2.1] ITU-T Recommendation G.984.1. “*Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General characteristics*”, Março 2003.
- [2.2] ITU-T Recommendation G.902. “*Framework Recommendation on functional access networks (AN) – Architecture and functions, access types, management and service node aspects*”, 1995.
- [2.3] ITU-T Recommendation I.112. “*Vocabulary of terms for ISDNs*”, 1993.
- [2.4] ITU-T Recommendation G.652. “*Characteristics of a single-mode optical fiber cable*”, 2003.
- [2.5] ITU-T Recommendation G.983.1. “*Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)*”, 1998.
- [2.6] ITU-T Recommendation G.984.2. “*Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification*”, Março 2003.
- [2.7] ITU-T Recommendation G.7041/Y.1303. “*Generic framing procedure (GFP)*”, Março 2003.

3. REDES EPON

O Grupo EFM (*Ethernet in the first mile*) apresentou o resultado do seu estudo em Junho de 2004, culminando na ratificação **IEEE 802.3ah** [3.1]. Recentemente, subscritores das redes de acesso baseadas em EPON tornaram-se um tópico importante na indústria assim como na pesquisa acadêmica. Os interesses das indústrias derivam-se no fato que EPON é a primeira tecnologia óptica prometedora para sua massificação nas redes de acesso. A finalização do padrão e as previsões de que a arquitetura EPON irá ter o mesmo sucesso e proliferação da sua antecessora LAN viraram-se um fator de impulso para que muitos operadores de telecomunicações no mundo iniciassem as primeiras provas com EPON, ou pelo menos começar o estudo da tecnologia. Ao contrário de outros padrões, IEEE 802.3 somente especifica uma pequena parte de um sistema de comunicações (somente a camada física e a camada de enlace do Modelo OSI) [3.2].

Os usuários das EPON pagam pelo serviço e confiam recebê-lo sem importar o estado da rede ou as atividades dos outros usuários. Diferente ao tradicional Ethernet, EPON deve garantir o nível de serviço acordado (*SLA: Service-level agreements*) para cada usuário, fornecendo alocação dinâmica da largura de banda, enquanto garantindo o bom comportamento de parâmetros como largura de banda, latência e perdas do pacote. Todo isto ainda é um assunto de pesquisa atualmente. Questões como atualizações de rede, codificação e autenticação são também muito importantes para o sucesso das EPON no ambiente do acesso público.

Neste capítulo, portanto, abordam-se definições específicas, parâmetros e variáveis relevantes para as redes EPON.

3.1 Foco do Estudo de IEEE 802.3 (Ethernet)

O foco do estudo de IEEE 802.3 está confinado às duas camadas mais baixas do modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection*); a camada física e a camada de enlace. Cada uma de estas camadas encontram-se divididas em subcamadas e interfaces. A Figura 15 mostra as subcamadas e interfaces definidas para dispositivos Ethernet operando a uma taxa de 1,25Gbps.

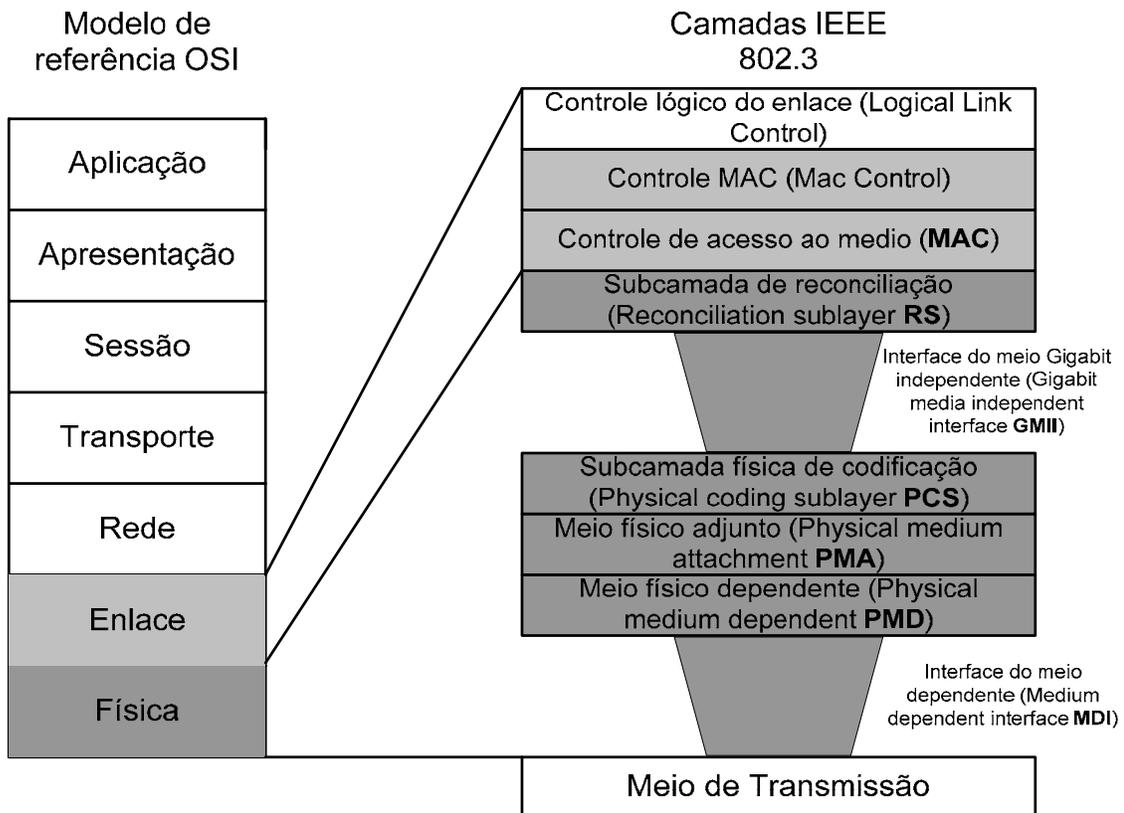


Figura 15: Modelo OSI e Camadas do Modelo de IEEE 802.3

IEEE 802.3 usa as seguintes subdivisões da camada física[3.2]:

- **RS;** Subcamada de reconciliação (*Reconciliation sublayer*): fornece mapeamento para os sinais da interface **GMII** até as definições de serviços da subcamada *controle de acesso ao meio*.
- **GMII;** Interface do meio Gigabit independente (*Gigabit Media Independent Interface*): especifica uma interface entre Gigabit MAC e a camada física de

Gigabit (PHY). O objetivo da interface é permitir a interconexão de várias equipes de terminal de dados (DTE: *Data Terminal Equipment*) com toda a variedade de implementações Gigabit da camada física.

- **PCS;** Subcamada física de codificação (*Physical coding sublayer*): contém as funções de codificação de bits em grupos de códigos que podem ser transmitidos através do meio físico.
- **PMA;** Meio físico adjunto (*Physical medium attachment*): contém as funções para a transmissão, recepção recuperação do relógio e alinhamento da fase.
- **PMD;** Meio físico dependente (*Physical medium dependent*): responsável da interface com o meio de transmissão.
- **MDI;** Interface do meio dependente (*Medium dependent interface*): especifica os sinais do meio físico e a interface mecânica e elétrica entre o meio de transmissão e os dispositivos da camada física.

A camada de enlace é formada pelas seguintes subcamadas:

- **LLC;** Controle lógico do enlace (*Logical link control*): define uma parte do acesso ao meio independente da camada de enlace. A subcamada LLC está fora do foco do estudo de IEEE 802.3.
- **Controle MAC** (*MAC Control*); é uma subcamada opcional que executa controle e manipulação em tempo real da operação da subcamada MAC. A estrutura e especificação da subcamada permitem novas funções para ser adicionadas ao padrão no futuro.
- **MAC;** Controle de acesso ao meio: em geral, define o encapsulamento de dados (endereçamento, detecção de erros) e o acesso ao meio (detecção de colisões).

3.2 Transmissão de Dados na EPON

O Padrão IEEE 802.3 define dois modos de operação para uma rede Ethernet. Na primeira configuração a rede pode ser desenvolvida sobre um meio compartilhado usando o protocolo de *acesso múltiplo por vigilância da portadora com detecção de colisões*

(CSMA/CD) [3.3]. Na segunda configuração, as estações podem ser conectadas através de um Switch usando enlaces bidirecionais (*full-dúplex*) ponto a ponto. A Ethernet MAC pode operar em uma das configurações anteriores, em modo CSMA/CD ou em modo *full-dúplex*.

O Meio em EPON não pode ser considerado totalmente compartilhado ou uma rede ponto a ponto, pelo contrario, é uma combinação dos dois. Tem conectividade de um meio compartilhado na direção de baixada (*Downstream*), e comportamento de um meio ponto a ponto na direção de subida (*Upstream*) [3.4].

3.3 Canal de Distribuição (*Downstream*)

No canal de distribuição (*Downstream*) os pacotes Ethernet transmitidos pela OLT passam através de um *splitter* (divisor) óptico passivo 1xN ou por *splitters* ópticos em cascata até a ONU. O valor de N oscila tipicamente entre 4 e 32 (limitado pela potência óptica disponível). Por natureza Ethernet usa *broadcasting* na direção de *downstream* (da rede até o usuario), encaixando perfeitamente com a arquitetura EPON onde os pacotes são transmitidos por *broadcast* pela OLT e são extraídos seletivamente por sua respectiva ONU de destino. A Figura 16 ilustra o processo.

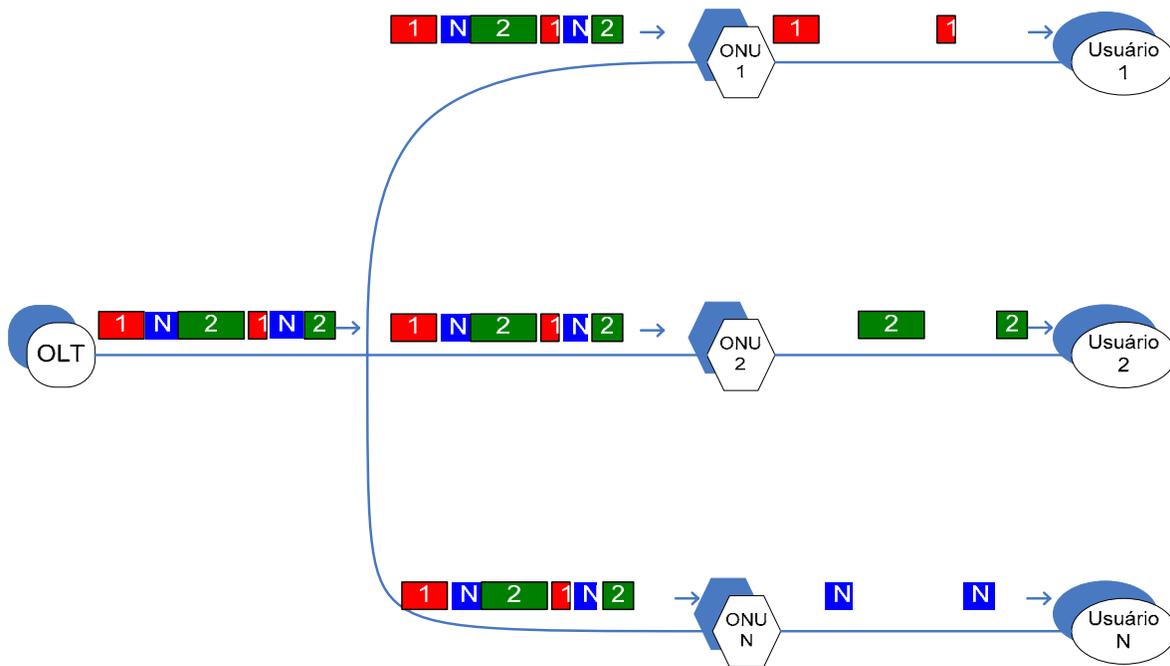


Figura 16: Transmissão de *Downstream* em EPON

3.4 Canal de Retorno (*Upstream*)

Na direção de subida (*upstream*), devido às propriedades dos combinadores ópticos passivos (*combiner*), os pacotes viajam desde a ONU até a OLT exclusivamente, e não alcançam as outras ONU. No canal de retorno (*Upstream*), o comportamento da EPON é similar a uma arquitetura ponto a ponto. Não obstante, ao contrario de uma rede real ponto a ponto, na EPON todas as ONU pertencem a um mesmo domínio de colisão, pacotes de dados de diferentes ONU transmitidos simultaneamente podem colidir. Por tanto, na direção de *upstream*, a EPON precisa utilizar algum mecanismo arbitrário para prever as colisões e para compartilhar o canal justamente para todas as ONU.

3.4.1 Acesso ao Meio Baseado em Contenda contra Acesso Garantido

O mecanismo de acesso ao meio baseado em **contenda**, similar ao CSMA/CD é difícil de implementar na EPON devido a que as ONU não conseguem detectar colisões graças as propriedades dos divisores/combinadores ópticos passivos. A OLT pode detectar a colisão e informar para a ONU enviando um sinal “*jam*”; entretanto, atrasos na propagação na PON que pode ter até 10Km de extensão, podem ocasionar uma redução considerável da eficiência de esse mecanismo de acesso. Geralmente quando se usa CSMA/CD nas redes das empresas os enlaces são curtos e o tráfego oferece dados com atrasos tolerantes. Os usuários das redes de acesso, no entanto, além dos dados precisam serviços de voz e vídeo, pelo qual é necessário garantir certos intervalos de tempo para a transmissão desse tipo de tráfego.

O outro mecanismo de acesso é **garantindo** um intervalo de tempo para todas as ONU transmitir a informação. Na EPON as ONU têm acesso exclusivo ao meio por um limitado intervalo de tempo, habitualmente chamado janela de transmissão ou *timeslot*. A Figura 17 ilustra o fluxo de dados na transmissão de subida na EPON.

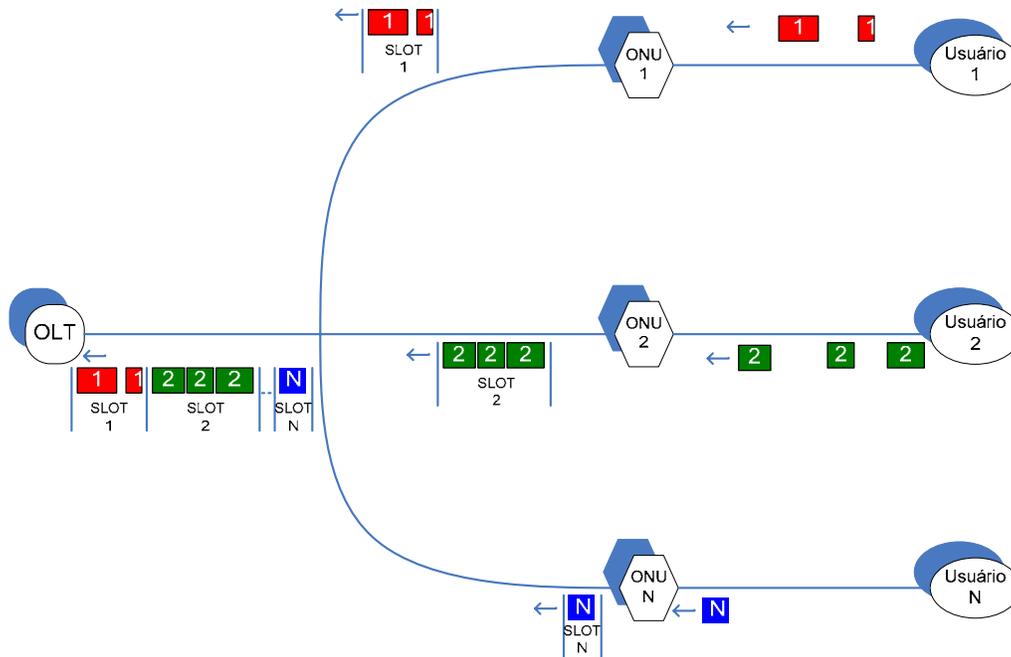


Figura 17: Transmissão de *Upstream* em EPON

Todas as ONU estão sincronizadas a um tempo de referência comum e para todas aloca-se um *timeslot*. Cada *timeslot* tem a capacidade de carregar vários pacotes Ethernet. A ONU armazena os *frames* recebidos até receber o *timeslot* para enviar a informação. EPON tem varias formas para a alocação do *timeslot* (garantindo o acesso ao meio) onde as ONU enviam os pacotes Ethernet; desde uma **forma estática** (TDMA fixo) até ajustes **dinâmicos** do tamanho do *slot*.

TDMA fixo é mais fácil de implementar. De uma forma simples todas as ONU poderiam ser programadas para começar e parar de transmitir para uns determinados intervalos periódicos. A rede que usa TDMA fixo apresenta baixa eficiência na presencia de pacotes de tamanho variável.

3.4.2 Controle de Acesso ao Meio para o Meio Garantido

O acesso garantido ao meio requer de algum controle do canal. Esse controle pode ser de tipo **centralizado** ou **distribuído**. No **esquema distribuído** (baseado na ONU) as ONU decidem quando transmitir informação e por quanto tempo (Esse esquema é similar ao “*token-passing*”). Todas as ONU antes de enviar dados, emitem uma mensagem especial anunciando quantos bytes vão transmitir. A próxima ONU que vai transmitir, agendada

previamente, monitora a transmissão da anterior ONU até a informação chegar à OLT para depois de isso começar enviar os dados. Usando este esquema distribuído, as transmissões não vão ser afetadas por colisões e não se desperdiça a largura de banda. A limitação do esquema radica em que as ONU precisam de conectividade e comunicabilidade entre elas. O que entra em conflito com a topologia geral em árvore da rede PON, também usando o mecanismo distribuído a implementação da rede aumentaria significativamente seu custo, as ONU seriam dispositivos mais complexos, portanto mais caros, pelo fato de ter que monitorar o estado da rede para saber quando transmitir e também se precisaria estender mais cabos de fibras para interconectar as ONU.

Nas redes ópticas de acesso contamos somente com conectividade desde a OLT até as ONU (canal *downstream*). Portanto, o controle do acesso ao meio fica concentrado pela OLT, esquema que se conhece como **esquema centralizado dinâmico** (baseado na OLT). Esse esquema busca que a OLT conhecendo exatamente o estado das ONU consiga alocar de forma precisa o *timeslot* para a transmissão de cada usuário. Uma solução factível para lograr o mecanismo de esquema centralizado dinâmico consiste em mensagens “grant” e mensagens “request”. As mensagens request são enviadas desde as ONU para reportar seu estado, a OLT processa essas mensagens e aloca diferentes janelas de transmissão (*timeslot*) para as ONU. A informação da alocação do *timeslot* é enviada através da mensagem grant desde a OLT até as ONU. A vantagem de ter inteligência centralizada no algoritmo de alocação do *timeslot* radica em que a OLT conhece o estado de toda a rede e pode chavear para outro esquema de alocação baseado nessa informação. Tudo isso causará que as ONU sejam dispositivos mais simples e baratos e a arquitetura da rede seja mais robusta. O objetivo do trabalho do padrão *IEEE 802.3ah assumiu como modelo o esquema centralizado* para o canal de retorno (*upstream*) [3.5].

Dado que algoritmos para alocar largura de banda dependem de diversos parâmetros, como serviços suportados, a instalação da rede e das condições do contrato oferecido pelo provedor (*SLA: service level agreement*), IEEE 802.3ah decidiu que seria errado estabelecer um algoritmo dinâmico específico de alocação da largura de banda (*DBA: dynamic bandwidth allocation algorithm*). Portanto o grupo declarou o DBA fora do padrão e foi deixado como eleição de cada vendedor. Para manter a interoperabilidade entre os dispositivos, IEEE 802.3ah desenvolveu o protocolo de controle multi-ponto (*MPCP:*

Multi-point control protocol) que facilita a implementação de varias alocações de banda na EPON.

3.4.3 Protocolo de Controle Multi-Ponto: MPCP

O protocolo MPCP foi desenvolvido como uma função da subcamada “controle MAC (MAC control)”. Essa subcamada tem como objetivo fornecer controle em tempo real e manipulação da operação da subcamada MAC. O MPCP tem dois modos de operação:

- Modo de alocação de banda: Para manter comunicação entre a OLT e as ONU, o MPCP deve fornecer periodicamente permissões de transmissão para todas as ONU.
- Modo de auto-descobrimto: Para descobrir novas ONU adicionadas à rede, o MPCP deve iniciar o processo de auto-descobrimto periodicamente.

Para outras configurações a subcamada de controle MAC é opcional, mas para **EPON é obrigatória devido a que EPON não consegue operar sem MPCP.**

3.4.3.1 Alocação de Banda

Usando a terminologia de IEEE 802.3ah, a alocação de banda se desempenha baseada em mensagens GATE e mensagens REPORT. Essas mensagens são *frames* da subcamada controle MAC.

A mensagem GATE é enviada desde a OLT até a ONU usa-se para alocar o *timeslot* para a transmissão dos dados da ONU. O *timeslot* é identificado por dois valores; tempo de inicio e comprimento {startTime, length}. Os valores do startTime e length são decididos pelo agente DBA e passam por um processo chamado “gating” na OLT. O processo “gating”, especificado no padrão, gera a mensagem GATE transmitindo-a até a ONU. Na ONU a mensagem é analisada e demultiplexada ao processo “gating” da ONU quem é responsável de permitir o começo da transmissão com o *timeslot* alocado pela mensagem recebida. Adicionalmente manda-se ao agente DBA uma indicação do recebimento da

mensagem GATE na ONU para permitir qualquer desempenho necessário das funções do algoritmo, por exemplo, selecionar a ordem dos *frames* a transmitir.

A mensagem REPORT é um mecanismo de retroalimentação (*feedback*) usado pela ONU para transferir suas condições atuais (ocupação do buffer) para a OLT, que usa essa informação para realizar boas decisões de alocação de banda. Similar à mensagem GATE a mensagem REPORT é iniciada pelo agente DBA. Depois é transmitida ao processo “report” na ONU, lugar onde se forma o *frame* e transmite-se a mensagem REPORT. Os *frames* somente podem ser enviados em *timeslots* previamente alocados. O *frame* REPORT recebida na OLT é analisado e demultiplexado ao processo “reporting” na OLT, quem manda a mensagem para o agente DBA. O DBA usa essa informação para fazer as alocações dos *timeslots* da próxima ronda de transmissão.

Na Figura 18 observamos o processo do protocolo MPCP para a alocação de banda.

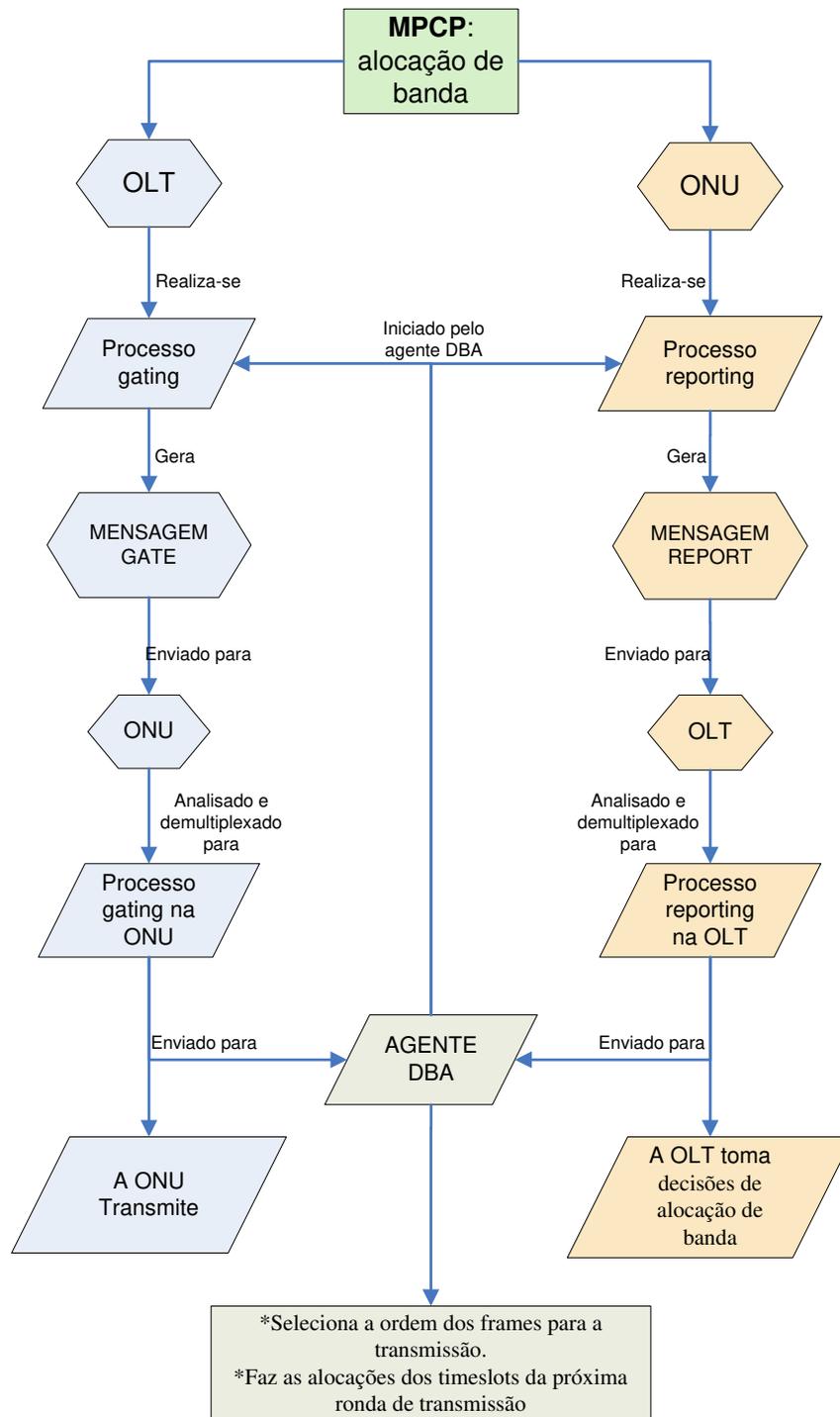


Figura 18: Protocolo MPCP: Alocação de Banda

A OLT tem duas formas de colocar o *timeslot* para as ONU transmitir. Uma forma consiste em que a OLT aloca o *timeslot* para a ONU n somente depois de receber os dados da ONU $n - 1$, esse modo chama-se de *alocação sequencial do timeslot*. Esse método é

ineficiente porque depois de ter sido enviado a mensagem GATE o canal permanecerá inutilizado durante toda a ronda de transmissão, a figura evidencia o problema. Aquele tempo em que a rede está desocupada chama-se de “walk time”. Em EPON a distancia entre a OLT e a ONU alcança até 20Km usando LASERS de alta potência o que provocaria que aqueles tempos “walk time” tivessem uma duração de até 200 μ s. A Figura 19: mostra a alocação do *timeslot* em modo seqüencial.

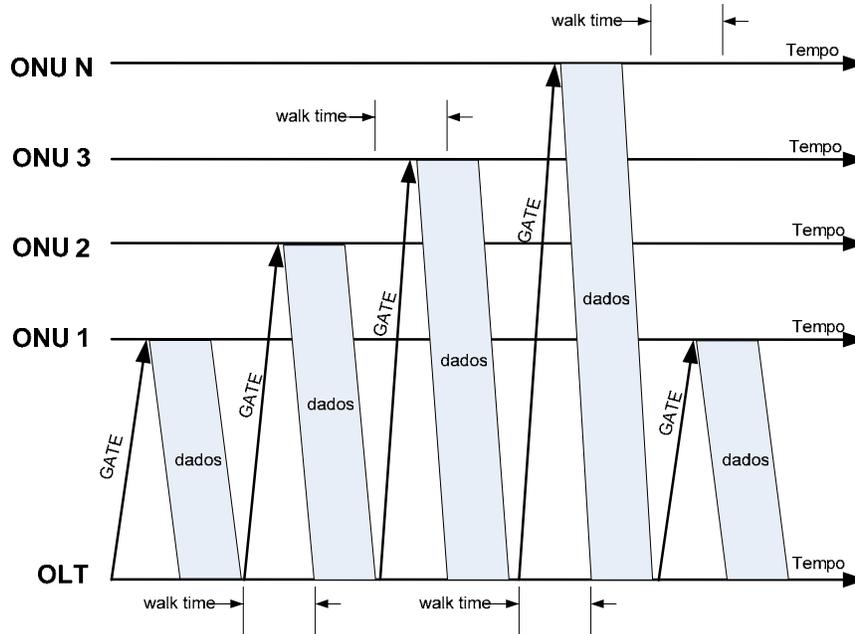


Figura 19: Alocação do *timeslot* de Forma Seqüencial

Para eliminar o problema do walk time, MPCP permite a alocação do *timeslot* de forma canalizada (pipelined *timeslot* assignment). Usando esse método a OLT manda para a ONU n a mensagem GATE antes de receber dados da ONU $n - 1$, ver Figura 20:.

O método precisa que a OLT conheça todos os tempos de resposta das ONU. A medida do tempo de respossto para as ONU é uma tarefa realizado pelo processo chamado auto-descobrimto (*autodiscovery*).

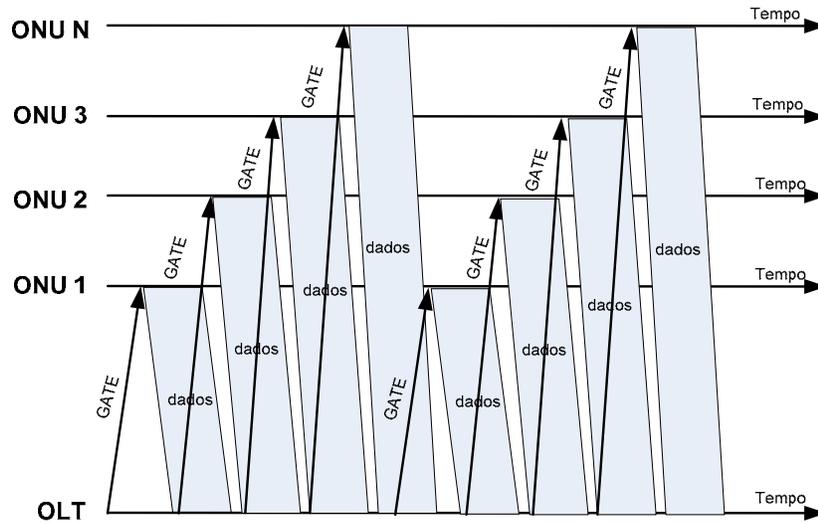


Figura 20: Alocação do *timeslot* de Forma Canalizada

Em muitas ocasiões o grupo EFM representou o *timeslot* na mensagem GATE com dois parâmetros {startTime, length}. Proponentes argumentaram que o tempo de chegada da mensagem GATE pode servir especificamente como o parâmetro startTime do *timeslot*. O inconveniente com este sistema de transmissão tão preciso radica em que pode acontecer algum atraso da mensagem GATE e de esta forma poderia ocasionar colisões nos dados. (Ver Figura 21)

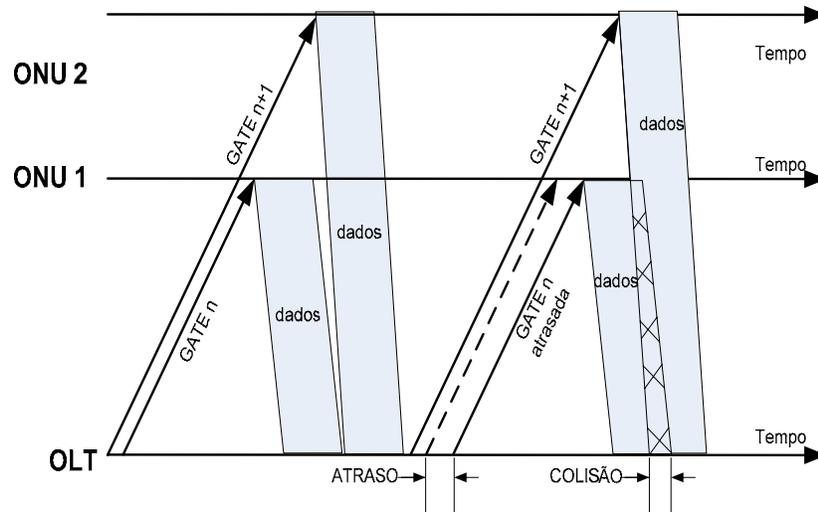


Figura 21: Colisões Possíveis Devido a Atrasos na Mensagem GATE

Para evitar o problema das colisões especificou-se especificamente o parâmetro *startTime* (tempo de início) do *timeslot* em cada mensagem GATE. Em lugar de usar a chegada da mensagem GATE como o tempo base, a ONU começa a transmissão quando seu relógio local é igual ao parâmetro *startTime* que vem encaminhado na mensagem GATE. O atraso na mensagem GATE não afetará a transmissão das ONU (*upstream*) enquanto a mensagem GATE chegue antes que o início do *timeslot* (Ver Figura 22). Para o sucesso do mecanismo a OLT e a ONU precisam de uma excelente sincronização dos relógios.

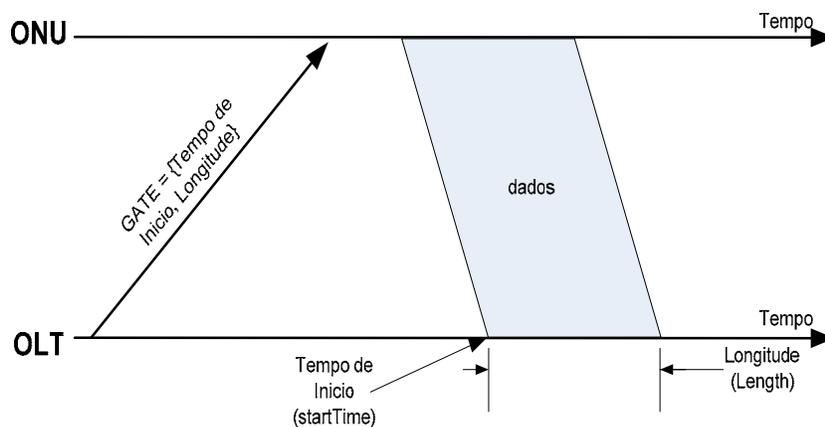


Figura 22: Tempo de Chegada GATE e Tempo de Início do *timeslot* (*startTime*)

Para lograr a sincronização a OLT e a ONU devem ter um relógio local chamado MPCP (*MPCP clock*). O relógio MPCP é um contador de 32bits em unidades de tempo Quanta (TQ: Time Quanta). TQ define-se como um intervalo de duração de 16ns ou o tempo requerido para transmitir 2 bytes a uma taxa de 1Gbps. Para sincronizar o relógio MPCP da ONU e o relógio MPCP da OLT, cada mensagem MPCP define um campo denominado *timestamp*. Na OLT, no controle de multiplexação; se escreve o valor do relógio MPCP no campo *timestamp* na mensagem de saída GATE, quando essa mensagem chega até a ONU, o controle do analisador ajusta seu relógio MPCP local ao valor respectivo recebido no campo *timestamp*.

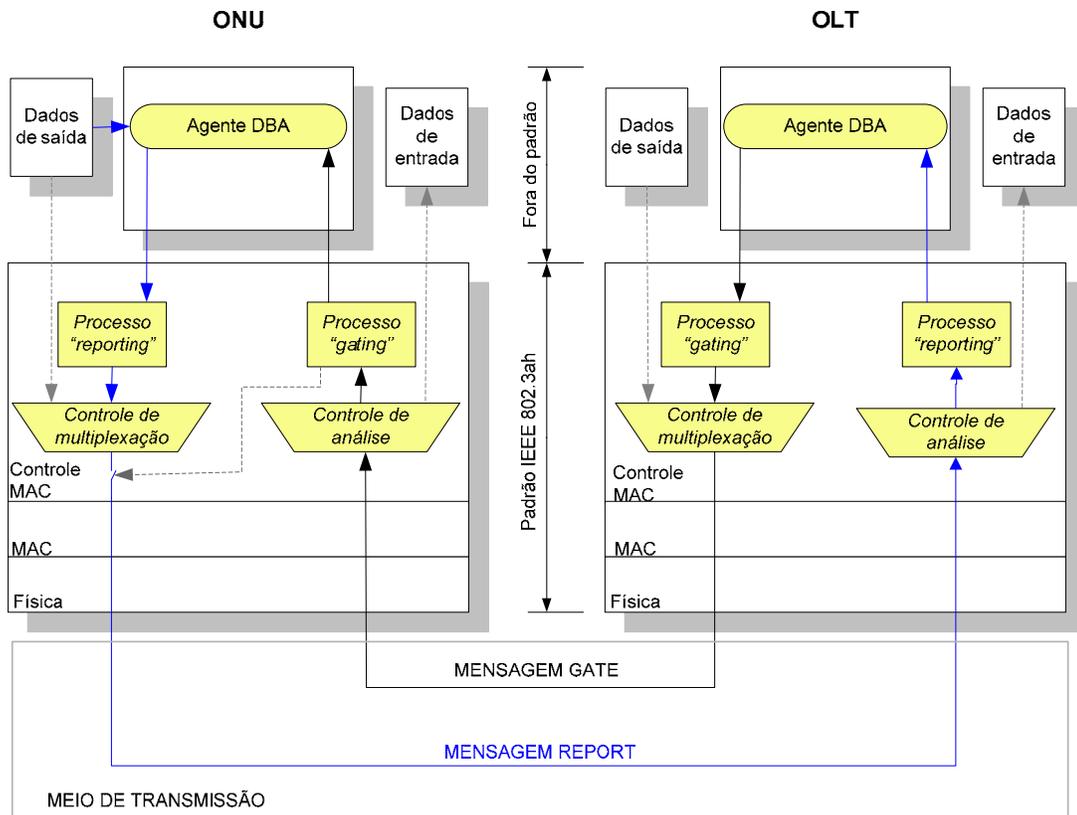


Figura 23: Método de Alocação de Banda Usando MPCP

3.4.3.2 Processo de Auto-Descobrimto (*autodiscovery*)

MPCP define um processo denominado “*discovery*”, um mecanismo usado para detectar as novas ONU conectadas à rede de acesso, também para conhecer o tempo que demoram na transmissão até a OLT e para aprender seus endereços MAC, ver Figura 24:.

O processo de auto-descobrimto utiliza 4 mensagens MPCP: GATE, REGISTER_REQ, REGISTER e REGISTER_ACK. As mensagens são transportadas em *frames* da subcamada controle MAC. O processo de auto-descobrimto segue os seguintes passos:

- O agente de descobrimto inicia uma ronda de “*discovery*” alocando uma janela de descobrimto. O agente DBA assegura que não existam ONU ativas para transmitir durante a janela de descobrimto. O agente de descobrimto inicia o processo *discovery*, mecanismo que gera uma

mensagem GATE especial denominada “discovery GATE”, anunciando o início do “*discovery slot*” e sua duração.

- Unicamente as ONU não inicializadas respondem á mensagem discovery GATE. Quando o relógio local na ONU alcança o tempo de início do *discovery slot*, a ONU transmite a mensagem REGISTER_REQ depois de esperar um tempo aleatório. A mensagem REGISTER_REQ contém o endereço fonte da ONU e uma marca de tempo (*timestamp*) representando o tempo local da ONU quando a mensagem REGISTER_REQ foi enviada. Quando a OLT recebe a mensagem REGISTER_REQ de uma ONU não inicializada, aprende seu endereço MAC e o tempo que demora em transmitir dados até a OLT (***RTT: Round Trip Time***, a diferença de tempos entre mandar a mensagem e a OLT receber a resposta de todas as ONU).
- Depois de analisar a mensagem REGISTER_REQ, a OLT envia diretamente a mensagem REGISTER para a ONU que está inicializando-se usando o endereço MAC aprendido no passo anterior. A mensagem REGISTER contém um valor de identificação único denominado enlace lógico ID (*logical link ID: LLID*) que é alocado pela OLT para cada ONU. Seguido da mensagem REGISTER a OLT envia uma mensagem normal de GATE para a mesma ONU.
- Finalmente, depois de receber as duas mensagens; REGISTER e normal GATE, a ONU manda uma mensagem chamada REGISTER_ACK de resposta para indicar à OLT o sucesso do análise da mensagem REGISTER. A mensagem REGISTER_ACK é enviada no *timeslot* garantido previamente pela mensagem GATE.

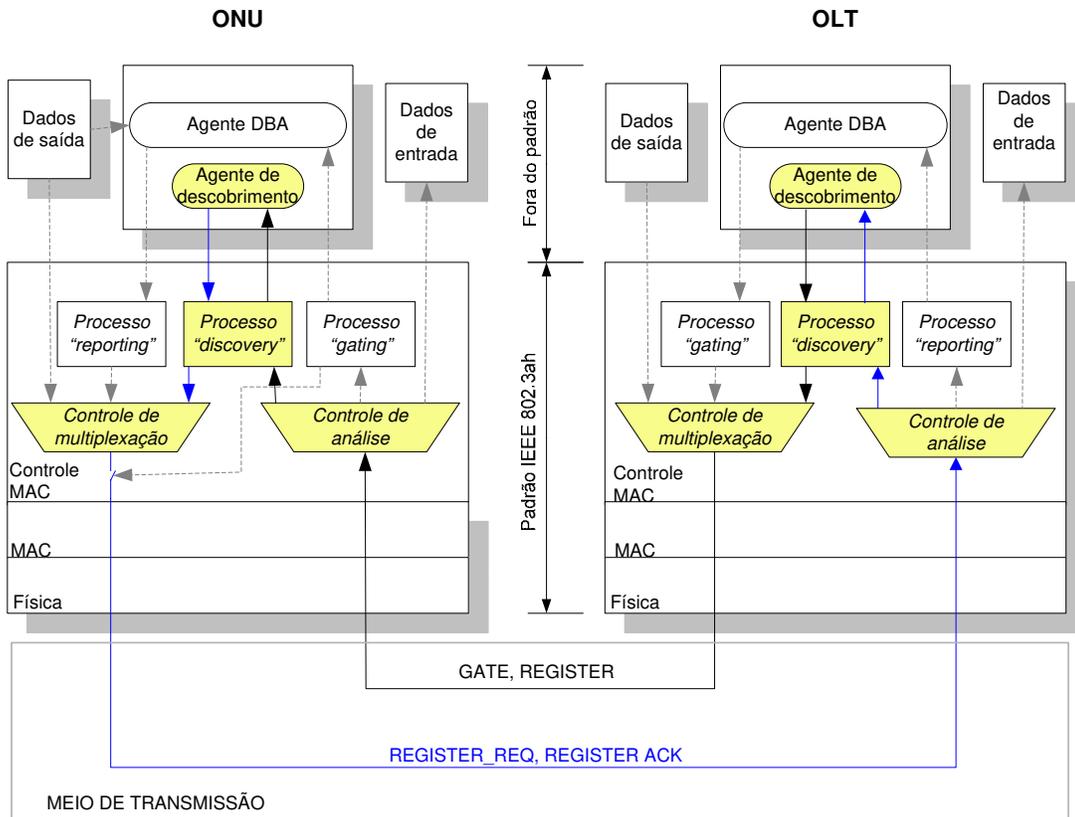


Figura 24: Método de Auto-Descobrimto Usando MPCP

3.5 Emulação da Topologia Lógica

O meio PON não permite a comunicação direta entre as ONU, devido às propriedades de direcionamento dos divisores/combinadores (*splitters/combiners*). Para EPON ser parte de IEEE 802.3 tem que cumprir com todos os requerimentos do padrão o que implica que todas as estações têm que estar interconectadas a um meio compartilhado e deveriam formar o mesmo domínio de colisão e lograr a comunicação entre elas.

Dispositivos conectados a um meio PON implementam uma função chamada **emulação da topologia lógica** (*Logical Topology Emulation, LTE*), baseado em sua configuração pode emular um meio compartilhado ou um meio ponto a ponto. LTE situa-se embaixo da subcamada MAC e tem como função rotular os *frames* Ethernet com etiquetas exclusivas para cada ONU. Essas etiquetas são chamadas identificadores de enlace lógico (*logical link indentifiers LLIDs*) e são alocadas no **preâmbulo** ao início de cada *frame*. Para

garantir a singularidade das LLIDs cada ONU tem alocada uma ou mais etiquetas pela OLT durante o processo de auto-descobrimto.

3.5.1 Emulação da Topologia Ponto-Ponto (P2PE)

O objetivo de P2PE é alcançar a mesma conectividade física que proporciona uma rede chaveada LAN, onde todas as estações estão conectadas a um switch central usando enlaces ponto-ponto. No modo P2PE a OLT deve ter N portas MAC (interfaces) para N ONU, ver Figura 25 . Durante o processo de registro da ONU, um exclusivo valor de LLID é alocado para cada ONU. Cada porta MAC na OLT alocará a mesma LLID para a correspondente ONU. Quando se envia um *frame* de *downstream* a função de emular na OLT insere a LLID associada com a porta MAC correspondente. Somente a ONU que tem exatamente a mesma LLID alocada previamente aceita a transmissão, as outras ONU rejeitam a informação.

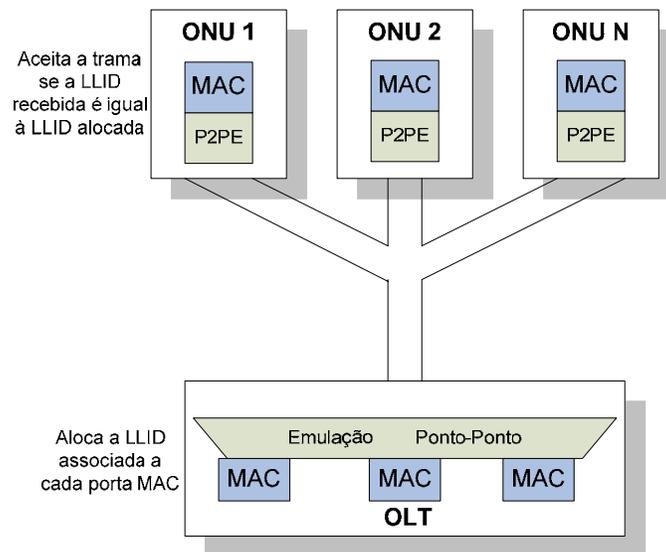


Figura 25: Modo *Downstream* de P2PE

Para o canal de retorno (*upstream*) a ONU insere a LLID alocada para ela no preâmbulo de cada *frame* transmitida. O mecanismo P2PE na OLT demultiplexará o *frame* para a correspondente porta MAC, ver Figura 26 .

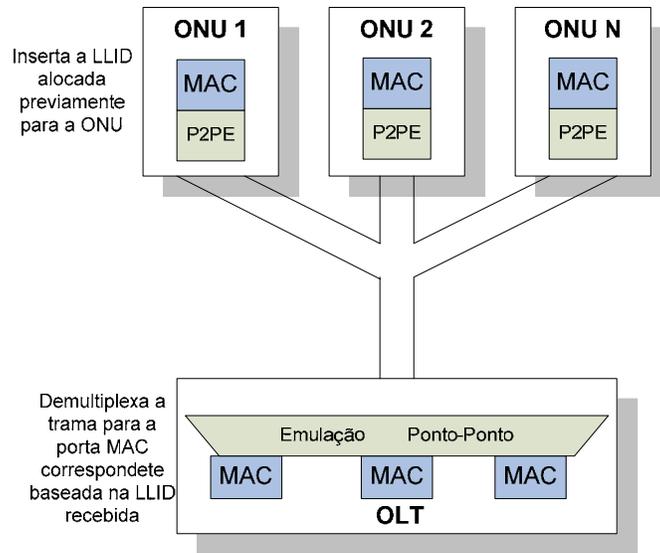


Figura 26: Modo *Upstream* de P2PE

3.5.2 Emulação do Meio Compartilhado (SME)

Na emulação do meio compartilhado, os *frames* transmitidos por qualquer nó (OLT ou qualquer ONU) devem ser recebidas por todos os nós (OLT e todas as ONU), exceto pelo remetente. No canal de distribuição (*downstream*) a OLT insere uma etiqueta denominada “*broadcast LLID*”, que será aceita por todas as ONU, ver Figura 27 .

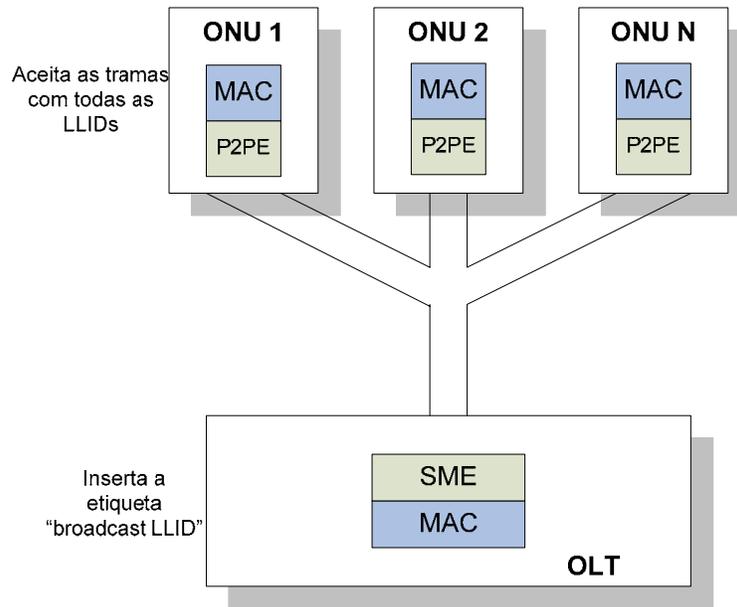


Figura 27: Emulação do Meio Compartilhado no Canal de Distribuição

No canal de retorno (*upstream*), a LTE tem como função na OLT refletir todos os *frames* de volta ao canal de distribuição (*downstream*) para ser recebidas pelas ONU. Ver Figura 28 . Para evitar a duplicação dos *frames*, quando a ONU recebe seu mesmo *frame*, a função LTE na ONU aceita o *frame* somente se a etiqueta LLID é diferente à etiqueta LLID alocada previamente para a ONU.

A emulação do meio compartilhado precisa somente uma porta MAC na OLT e apresenta a PON como uma ponte (*bridge*) para um único domínio de acesso.

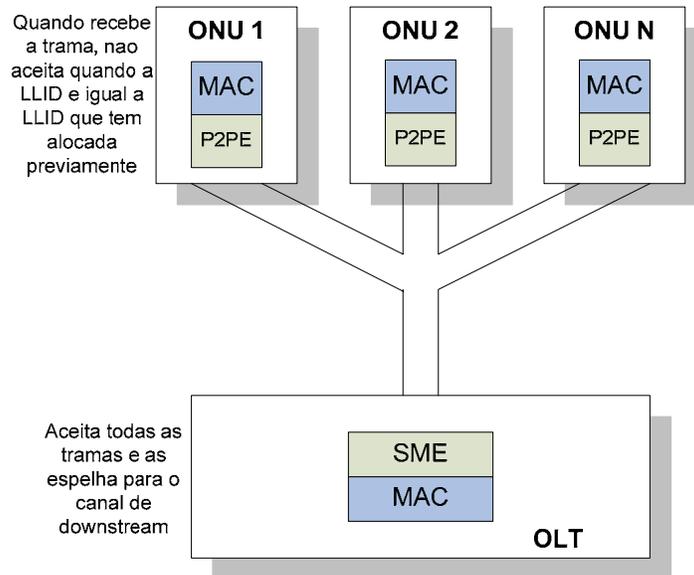


Figura 28: Emulação do Meio Compartilhado no Canal de Retorno

3.5.3 Combinação de P2PE e SME

Para obter maior eficiência o grupo de estudo de IEEE 802.3ah considerou a possibilidade de usar simultaneamente o modo ponto-ponto e o modo de meio compartilhado [3.6]. Para identificar que modo vai-se usar com cada *frame* de dados, a extensão de 16 bits do campo LLID tem sido dividido em um bit para identificar o modo de emulação e 15 bits de LLID (identificação do enlace lógico). Quando o bit modo de emulação é 0 indica emulação ponto-ponto e quando é 1 indica emulação de meio compartilhado. Tecnicamente a solução pôde ter sido desenvolvida, mas foi proposta tarde para ser incluída no padrão.

3.5.4 Solução Adotada pelo Padrão

O grupo IEEE 802.3ah decidiu manter unicamente a emulação do meio ponto-ponto e adicionar uma porta auxiliar na OLT denominada cópia única de *broadcast* (*single copy broadcast SCB*). Usando essa configuração, uma EPON com N ONU deverá ter N+1 MAC, uma para cada OLT e uma para o canal de difusão (*downstream*), ver Figura 29 .

A porta SCB é usada exclusivamente para *broadcast*, as ONU não têm permitido enviar *frames* no canal de retorno (*upstream*) com LLID *broadcast*, com exceção das

mensagens usadas pela ONU para o processo de registro e para o processo de auto-descobrimto.

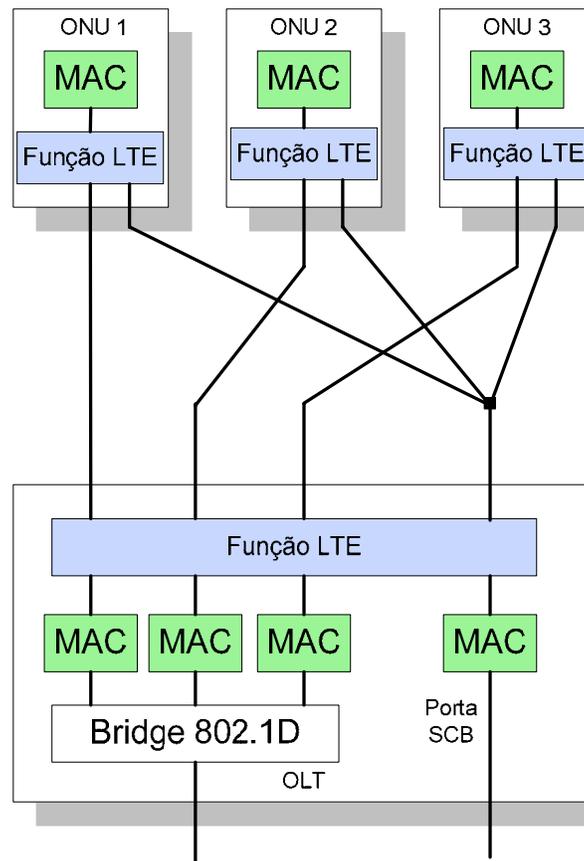


Figura 29: Solução Final para a Emulação da Topologia Lógica

3.6 Formato do *frame* Preâmbulo

O grupo IEEE 802,3ah modificou o formato do preâmbulo do *frame* de Ethernet para permitir acesso à informação adicional, ver Figura 30 . No dispositivo remetente, a função LTE alocada na subcamada reconciliação, troca vários bits do preâmbulo com diversos campos: delimitador do início LLID (*start of LLID delimiter, SLD*), LLID que consiste em um bit de modo e de a identificação lógica do enlace e 8 bits de verificação de redundância cíclica (CRC-8). A função LTE no receptor extrai esses campos substituindo-os pelo padrão convencional do preâmbulo antes de envia-o para a subcamada MAC.

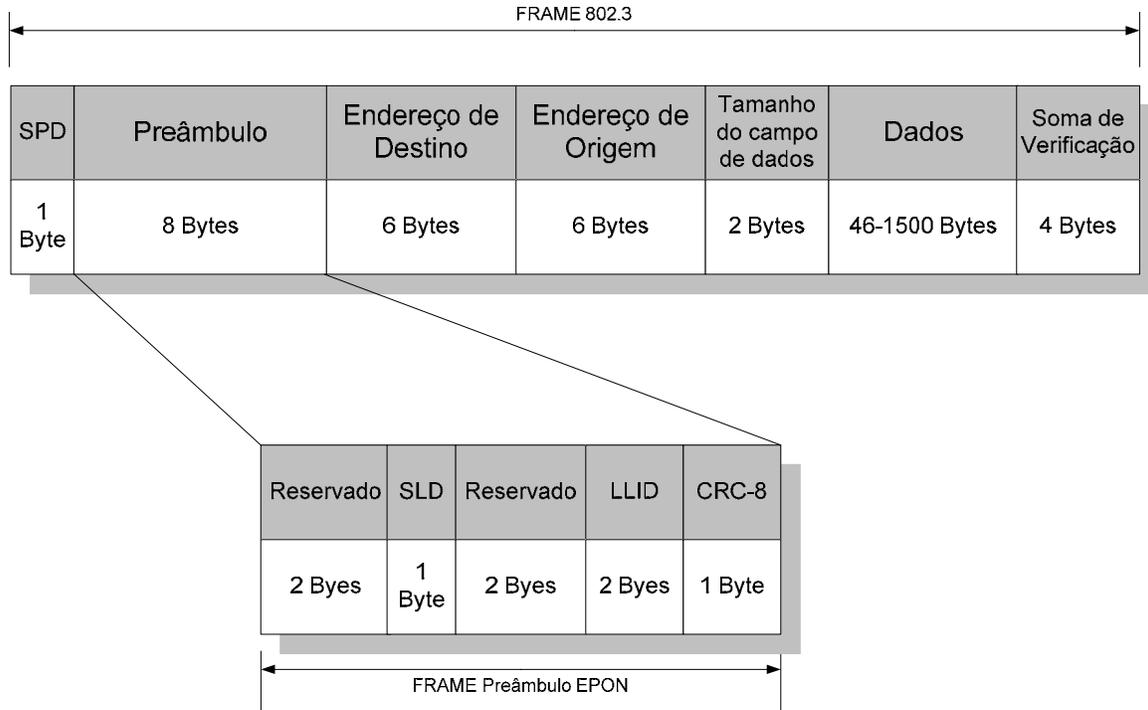


Figura 30: Formato do *Frame* Preâmbulo

3.7 Controle do LASER

Em setembro de 2003 foi apresentada uma solução que permite que a subcamada PCS (Ver Figura 15) monitore o passo das unidades de dados e faz decisões na ONU de quando o LASER tem que ser ligado e quando desligado. Essa função foi denominada **detecção de dados** (*data detector*) e é uma nova função da subcamada PCS [3.2].

No caminho seguido pelos dados, aloca-se o detector de dados depois da codificação 8B/10B, por tanto opera sob palavras de 10 bits, geralmente denominadas códigos de grupo (*code-groups*). Basicamente o detector de dados é um **tempo adicionado** (*delay-line*) que impõe uma constante de atraso sob os dados que passam pela subcamada PCS. Aquele tempo de atraso (*delay-line*) implementa-se para fornecer o tempo suficiente para que a camada física ligue o LASER e para gerar a sincronização necessária antes da transmissão dos dados. Esta seqüência de sincronização consiste em códigos de grupo “idle” requeridos pelo receptor para realizar o ajuste do ganho do LASER (intervalo AGC:

Automatic Gain Control) e a sincronização do relógio (intervalo CDR: *Clock and Data Recovery*). O detector de dados pode ser implementado como um buffer FIFO.

Na inicialização, o buffer é cheio com códigos de grupo “idle”, quando chega o primeiro código de grupo não “idle”, o buffer imediatamente gera um sinal para ligar o LASER. No momento em que o primeiro código de grupo de dados alcança a “head” do buffer, o LASER estará totalmente ligado e a seqüência necessária de sincronização será transmitida. O atraso introduzido pelo buffer FIFO deveria ser o tempo necessário para ligar o LASER e para gerar a seqüência de sincronização necessária pela OLT para o ajuste do ganho e para a sincronização dos relógios. O padrão IEEE 802.3ah especifica o tempo necessário para ligar o LASER T_{on} em 512ns, o tempo do ajuste do ganho T_{AGC} e o tempo para sincronizar os relógios T_{CDR} podem variar, mas não podem exceder os 400ns cada um. Adicionalmente são alocados 32ns ($T_{code_group_align}$) ao receptor para alinhar os códigos de grupo recebidos. Portanto o tempo máximo de atraso introduzido no buffer FIFO não supera os 1344ns. Os códigos de grupo chegam cada 8ns, por conseguinte o buffer FIFO pode armazenar no máximo 168 códigos de grupo.

Quando o ultimo código de grupo não “idle sai do buffer”, o detector de dados gera um sinal para desligar o LASER. Desde que o buffer não tenha informação, garanta-se para o detector de dados o tempo suficiente para ligar o LASER quando chegarem os próximos códigos de grupo não “idle”.

Outro aspecto importante da função de detecção de dados radica em que se a ONU tem garantido um *timeslot* e não tem dados para transmitir, o LASER não será ligado. É importante que a OLT seja desenhada para aceitar esses comportamentos da ONU. Existem implementações de OLT que são baseadas na detecção da potência óptica dentro do *timeslot* alocado para a ONU para assegurar-se que a ONU está ativa. Essas implementações não poderiam operar corretamente se a ONU não tivesse permitido ligar o LASER.

3.8 Correção de Erros Caminhante: FEC (*Forward Error Correction*)

O padrão IEEE 802.3ah especifica um mecanismo opcional de correção de erros (*forward error correction: FEC*). O mecanismo FEC acontece durante a transmissão, de

este modo, reduzindo a taxa de erro de bit (*BER: bit error ratio*). O ganho fornecido pela FEC usa-se para incrementar a distância entre a OLT e as ONU ou para melhorar a fiabilidade da rede.

FEC é um método de controle de erro nas comunicações digitais, que processa os dados antes da transmissão. Esse pré-processamento implica adicionar redundância à informação original, tal que, usando essa informação redundante, o dispositivo receptor é capaz de detectar e corrigir erros na transmissão. As principais categorias dos métodos de FEC são as seguintes: codificação de bloco (*block-coding*), codificação convolucional (*convolutional-coding*) e codificação turbo (*turbo-coding*).

Um dos códigos mais utilizados é o código Reed-Solomon (RS). O código RS denota-se como RS (n,k), onde n significa o comprimento da informação codificada (saída) e k significa o comprimento da informação original (entrada). A codificação RS não opera sob bits individuais, opera ao longo de símbolos de m-bits. O comprimento do código de bloco n é relativo ao comprimento do símbolo da seguinte maneira:

$$n = 2^m - 1 \quad (3.1)$$

Deste modo, se são usados símbolos de 8 bits o comprimento do código é de n=255. O código RS toma um bloco de k símbolos de informação e adicionam n-k símbolos de redundância. O padrão IEEE 802.3ah denomina esses símbolos de redundância como **dados de paridade**. O código RS é conhecido como um código sistemático, o que significa que os dados de paridade são adicionados ao final dos símbolos de informação, deixando o bloco de informação sem câmbios.

O padrão IEEE 802.3ah adotou o esquema RS (255,239). Este esquema opera sob símbolos de 8 bits adicionando 16 símbolos de paridade por cada bloco [3.8].

3.9 Enlace Ponto a Ponto Gigabit Ethernet

As redes ou enlaces *ponto a ponto* são aquelas que respondem a um tipo de arquitetura de rede onde cada canal de dados usa-se para comunicar unicamente dois nós, em contraposição às redes *multiponto*, nas quais cada canal de dados pode-se usar para comunicar diversos nós. Em um enlace ponto a ponto, os dispositivos interligados atuam

como sócios iguais, ou pares entre si. Como pares, cada dispositivo pode tomar o papel de escravo ou a função de mestre.

Os enlaces ponto a ponto são relativamente fáceis de instalar e operar. À medida que as redes crescem, os enlaces se voltam mais difíceis de coordenar e operar. Sua eficiência decresce rapidamente à medida que a quantidade de dispositivos na rede aumenta. Os enlaces que interconectam os nós de uma rede ponto a ponto podem-se classificar em três tipos segundo o sentido das comunicações que transportam: *Simplex*; A transmissão só se efetua em um só sentido. *Half-dúplex*; A transmissão se realiza em ambos sentidos, mas de forma alternativa. *Full-Dúplex*; A transmissão pode-se levar a cabo em ambos sentidos simultaneamente. Quando a velocidade dos enlaces Semi-dúplex e Dúplex é a mesma em ambos sentidos, diz-se que é um enlace simétrico, em caso contrário se diz que é um enlace assimétrico. Nosso caso estudará um enlace *Full-Dúplex*.

Gigabit Ethernet, também conhecida como GbE, é uma ampliação do padrão Ethernet (concretamente a versão 802.3ab e 802.3z do IEEE) que consegue uma capacidade de transmissão de 1 Gigabit por segundo, correspondentes a uns 1000 Megabits por segundo de rendimento contra uns 100 de *Fast Ethernet* (Também chamado 100BaseT).

Gigabit Ethernet surge como conseqüência da pressão competitiva de ATM por conquistar o mercado LAN e como uma extensão natural das normas Ethernet 802.3 de 10 e 100Mbps que prometem tanto em modo semi-dúplex como dúplex, uma largura de banda de 1Gbps. Em modo semi-dúplex, o padrão GbE conserva com mínimas mudanças o método de acesso CSMA/CD típico de Ethernet. Sobre as dimensões da rede, não há limites à extensão física ou ao número de nós. Igualmente que seus predecessores, Gigabit Ethernet suporta diferentes meios físicos, com diferentes valores máximos de distância. O IEEE 802.3 *Higher Speed Study Group* (Grupo de estudo de alta velocidade) identificou três objetivos específicos de distância de conexão: conexão de fibra óptica multimodo com um comprimento máximo de 500m (conexão usada para nossos testes); conexão de fibra óptica monomodo com uma distância máxima de dois quilômetros; e uma conexão baseada em cobre com um comprimento de pelo menos 25m.

Para realizar provas experimentais no laboratório, decidiu-se aproveitar os recursos técnicos do grupo e fazer um enlace ponto-ponto Gigabit Ethernet para estudar e analisar

desde o ponto de vista da camada 2, (camada onde radica a operação das redes EPON e GPON), o comportamento deste tipo de redes, muito similares ao padrão IEEE EPON, usando o *software* livre Ethereal (analisador de protocolos) [3.9].

3.9.1 Resultado Experimental

Primeiramente queríamos desenvolver uma topologia de rede de tipo anel usando os computadores e as placas Gigabit Ethernet de nosso laboratório, mas, depois de estudar os protocolos envolvidos na rede, encontramos que somente era fatível implementar um enlace ponto a ponto com os recursos tecnológicos presentes no laboratório. Para o enlace ponto a ponto realizado, usaram-se os seguintes dispositivos: Duas máquinas INTEL com sistema operativo Windows XP, duas placas Gigabit Ethernet “1000Base-SX Fiber” e um cabo de fibra conectorizado (conectores tipo SC) Full-Dúplex com perdas de inserção de 0,28dB e 3 metros de comprimento (65 μ m).

A arquitetura usada foi a seguinte (Figura 31:

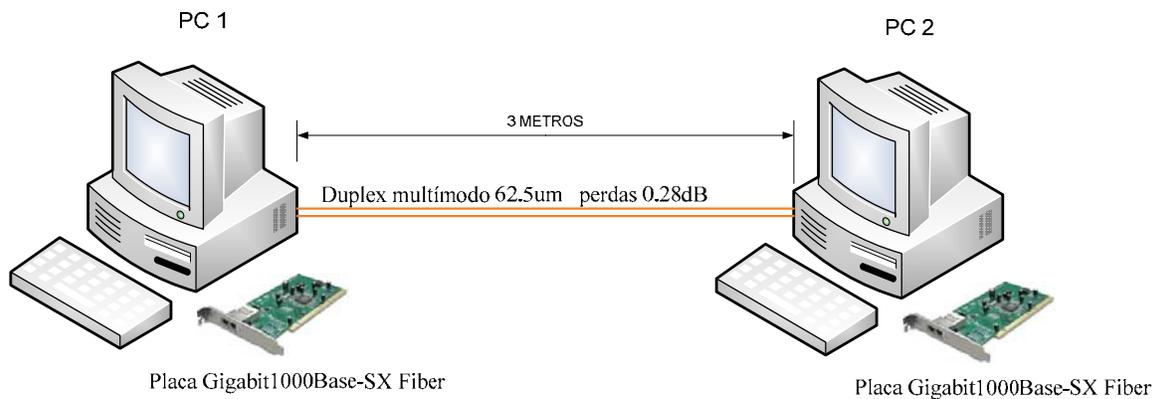


Figura 31: Enlace Ponto a Ponto Gigabit Ethernet

No enlace ponto a ponto usaram-se placas Gigabit Ethernet da empresa TRENDnet, referência TEG-PCISM2. A instalação das placas é muito simples, as placas usam o mecanismo de instalação “*PLUG and PLAY*” com suporte para Linux e Windows.

Os dois computadores se configuraram com os seguintes endereços IP:

- PC1: 192.168.1.101
- PC2: 192.168.1.103

Para analisar o enlace desde o ponto de vista da camada 2, realizamos 4 provas experimentais:

- Prova com comando PING.
- Prova com *CHAT (Bate-papo)*.
- Prova compartilhando *desktop*.
- Prova enviando arquivo.

3.9.1.1 Prova com Comando PING

O Comando PING (*Packet Internet Grouper*) trata-se de uma utilidade que comprova o estado da conexão com um ou várias equipes remotas por meio dos pacotes de solicitação de eco e de resposta de eco (definidos no protocolo de rede ICMP) para determinar se um sistema IP específico é acessível numa rede. É útil para diagnosticar os erros em redes ou roteadores IP. Muitas vezes se utiliza para medir a latência ou tempo que demoram em comunicar-se dois pontos remotos, deste modo, utiliza-se entre os usuários de jogos em rede o termo PING para referir-se ao *LAG* ou latência de sua conexão.

Usando o software Ethereal, obtivemos os seguintes resultados depois de enviar um PING desde o PC2 até o PC3: 11 *frames* dos quais, como era esperado, 8 são do protocolo ICMP, 2 do protocolo ARP e 1 do protocolo NBNS. Por configuração o software coloca o eixo vertical na direita, situação que se poderia intervir em um futuro trabalho devido a que é um software livre e pode-se alterar o código do programa.

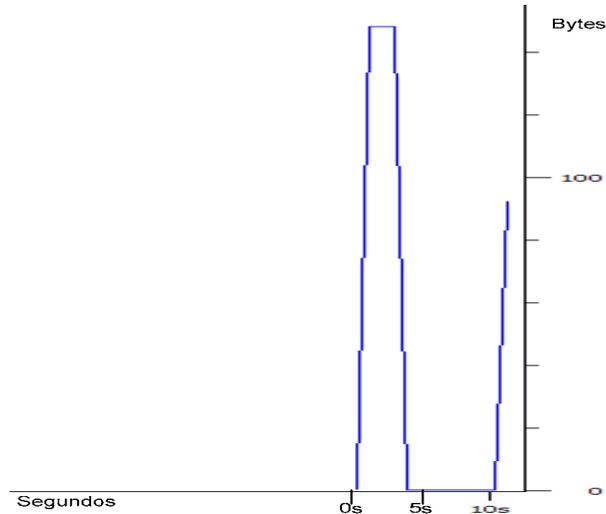


Figura 32: Comando PING

O protocolo ICMP (protocolo de mensagens de controle em internet) fornece capacidades de controle e envio de mensagens. ICMP é um subprotocolo de controle e notificação de erros do Protocolo de Internet (IP). Como tal, usa-se para enviar mensagens de erro, indicando, por exemplo, que um serviço determinado não está disponível ou que um roteador ou *host* não pode ser localizado. ICMP difere do propósito de TCP e UDP já que geralmente não se utiliza diretamente pelas aplicações de usuário na rede. A única exceção é a ferramenta *ping* e *traceroute*, que enviam mensagens de petição ICMP (e recebe mensagens de resposta) para determinar se um host está disponível, o tempo que lhe toma aos pacotes em ir e regressar a esse host e quantidade de hosts pelos que passa. Muitas vezes se utiliza para medir a latência ou tempo que demoram em comunicar-se dois pontos remotos.

O protocolo ARP. (*Address Resolution Protocol*) Protocolo de resolução de endereços, é responsável de encontrar o endereço físico (Ethernet MAC) que corresponde a um determinado endereço IP. Para isso se envia um pacote (*ARP request*) ao endereço de multidifusão da rede (broadcast (MAC = ff ff ff ff ff ff)) que contém o endereço IP pela que se pergunta, esperando que essa máquina (ou outra) responda (*ARP reply*) com o endereço Ethernet que lhe corresponde. O protocolo RARP realiza a operação inversa. Em Ethernet, a capa de enlace trabalha com endereços físicos. O protocolo ARP se encarrega de traduzir os endereços IP a endereços MAC (direções físicas). Para realizar esta conversão, o nível

de enlace utiliza as tabelas ARP, cada interface tem tanto um endereço IP como um endereço físico MAC.

O protocolo NBNS (*NetBios Name Server*) permite ao usuário, em caso de desconhecer ou simplesmente não recordar o endereço IP do módulo, procurá-lo literalmente pelo nome na rede LAN desde um navegador web.

Ao executar o comando PING acontece o seguinte ao nível de camada 2:

- a. O PC2 manda uma petição ARP em modo *broadcast* para conhecer qual é o endereço MAC do endereço IP solicitado (PC1). Também envia o endereço MAC da máquina PC2.
- b. O PC1 responde a petição ARP e aprende o endereço MAC do PC2, também envia seu próprio endereço MAC, desta maneira o PC2 já sabe onde está o PC1 e pode começar a enviar as mensagens ICMP do comando PING. Lembrando que na camada 2, se trabalha com endereços MAC, não com endereços IP.
- c. O PC2 envia a primeira petição PING, usando o protocolo ICMP (*Request*).
- d. O PC1 responde ao PC2 a petição de PING (*acknowledge*).
- e. O PC2 envia a segunda petição PING, usando o protocolo ICMP (*Request*).
- f. O PC1 responde ao PC2 a petição de PING (*acknowledge*).
- g. O PC2 envia a terceira petição PING, usando o protocolo ICMP (*Request*).
- h. O PC1 responde ao PC2 a petição de PING (*acknowledge*).
- i. O PC2 envia a quarta e última petição PING, usando o protocolo ICMP (*Request*).
- j. O PC1 responde ao PC2 a petição de PING (*acknowledge*).
- k. O PC2 usando o protocolo NBNS envia via broadcast seu nome para se identificar na rede.

Para ver com detalhe todo o processo, ver o Anexo B.

3.9.1.2 Prova com CHAT (bate-papo)

O segundo experimento foi realizar uma sessão de bate-papo (*chat*), entre as duas máquinas, usando o software MICROSOFT NetMeeting. Se estabeleceu a sessão durante 54 segundos aproximadamente, obtendo os resultados mostrados na Figura 33 .

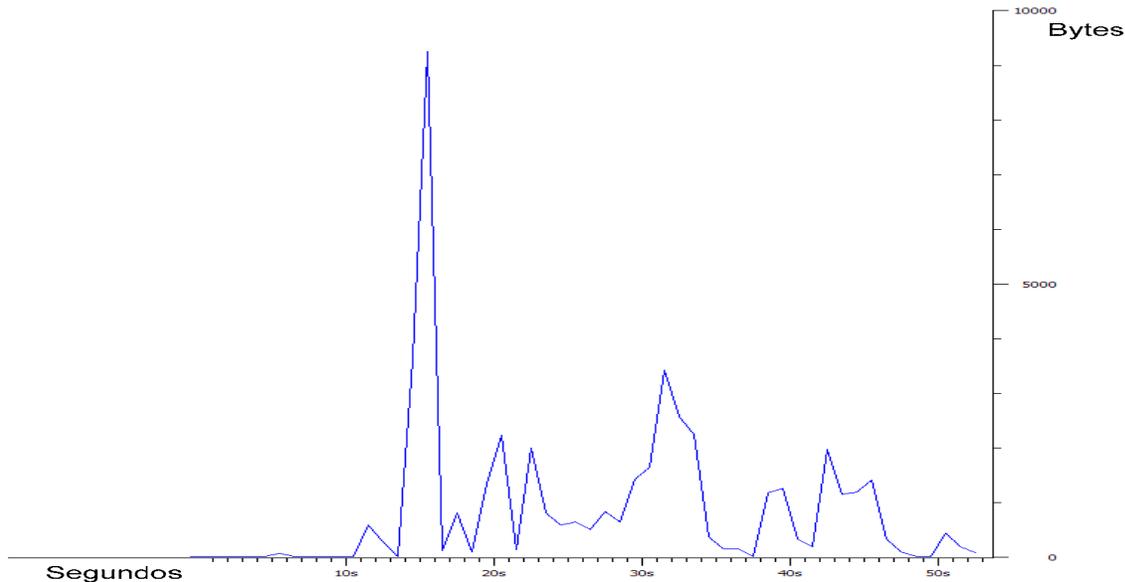


Figura 33: Prova com CHAT

Encontramos que a sessão mandou 561 *frames* e se usaram os seguintes protocolos; TCP (55.06%), UDP (41.16%), Q.931 (1.71%), NBNS (1.54%) e BROWSER (0.51%). Cada pico na figura anterior indica quando se enviou uma mensagem de um computador para o outro.

TCP é um protocolo de comunicação orientado a conexão, fiável que se encontra na camada de transporte, atualmente documentado por IETF RFC 793. É um protocolo de capa 4 segundo o modelo OSI. Na pilha de protocolos TCP/IP, TCP é a camada entre o protocolo de internet (IP) e a camada de aplicação. Habitualmente, as aplicações precisam que a comunicação seja fiável e, dado que a capa IP oferece um serviço de datagramas não fiável (sem confirmação), TCP adiciona as funções necessárias para prestar um serviço que permita que a comunicação entre dois sistemas se efetue livre de erros, sem perdas e com boa segurança.

UDP (*User Datagram Protocol*) é um protocolo do nível de transporte baseado no intercâmbio de datagramas. Permite o envio de datagramas através da rede sem que se tenha estabelecido previamente uma conexão, já que o próprio datagrama incorpora suficiente informação de endereçamento em seu cabeçalho. Também não tem confirmação, nem controle de fluxo, pelo que os pacotes podem adiantar-se uns a outros; e também não se sabe se chegou corretamente, já que não tem confirmação de entrega ou de recepção.

Q.931 é o protocolo de controle de conexão das redes *ISDN*, pode ser comparado com o protocolo TCP, sem esquecer que o protocolo Q.931 é da camada 3. Q.931 não fornece controle de fluxo ou execução de retransmissão. É um protocolo utilizado principalmente para o estabelecimento de chamadas na rede *ISDN*.

O protocolo *BROWSER* oferece um mecanismo para descobrir os servidores que estão executando serviços particulares na rede.

No processo se aprecia como os protocolos UDP e TCP predominam, resultado esperado devido a ter estabelecido uma sessão de bate-papo. O protocolo *BROWSER* aparece 3 vezes, a primeira, como uma petição do PC1, depois como petição do PC2, procurando se tem próximo servidor e identificando o nome e os domínios estabelecidos na rede, estas petições se realizam enviando uma mensagem via broadcast usando esse protocolo.

3.9.1.3 Prova Compartilhando *Desktop*

O software *MICROSOFT NetMeeting* tem uma opção para controlar remotamente o *desktop* de um computador desde outra máquina, fazendo uso de esta opção durante um período de aproximadamente 136 segundos, analisamos o que estava acontecendo ao nível de protocolos e encontramos o seguinte:

O tráfego registrou 3269 *frames* e aproximadamente 1456190 bytes, com uma média de 24.119 pacotes por segundo e uma média de 445.454 bytes por pacote.

A Figura 34 mostra a seção de compartilhamento de *desktop* realizada.

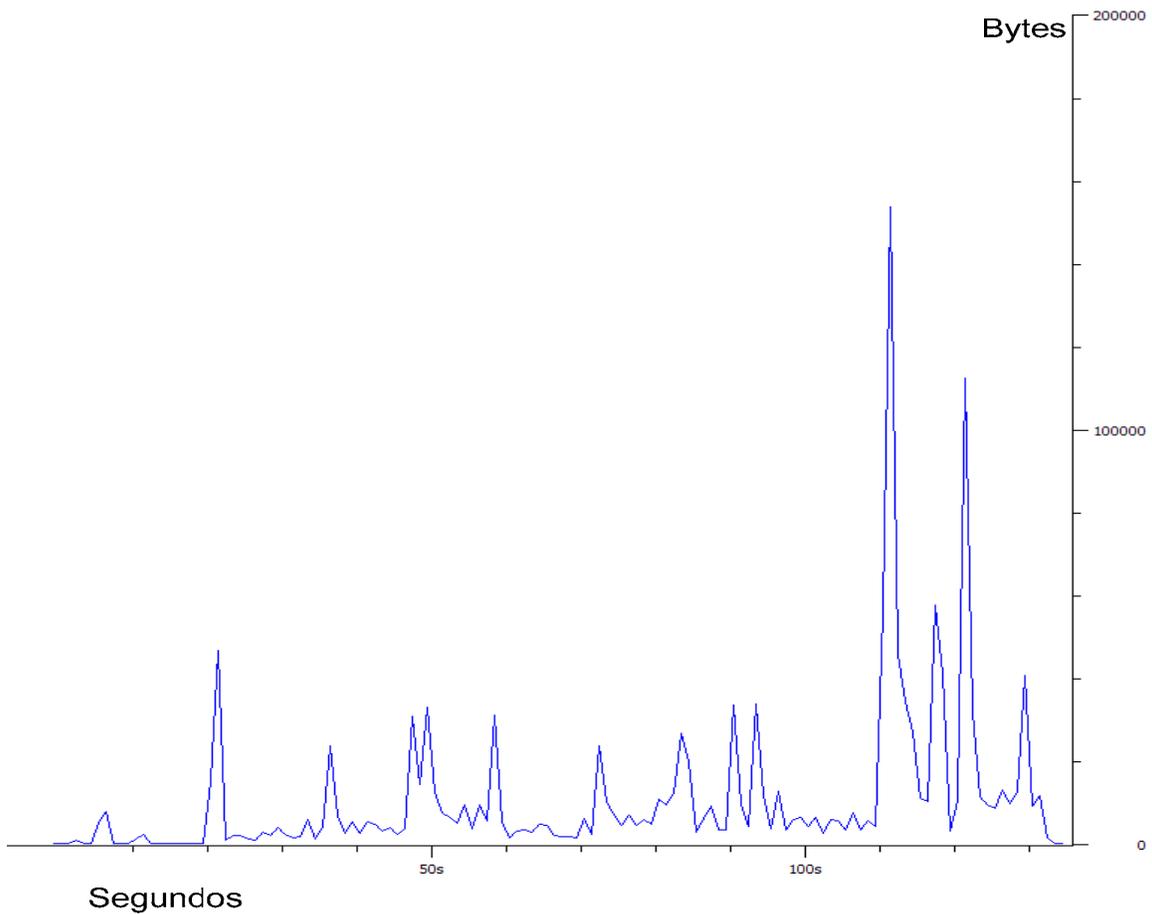


Figura 34: Prova Compartilhando Desktop

Encontramos que para a sessão se usaram os seguintes protocolos; ARP (0.0605%), NBNS (0.605%), Q.931 (0.4238%), TCP (93.0063%) e UDP (33.1516%).

Encontramos que a maior porcentagem do tráfego foi do protocolo TCP, resultado lógico devido a que aquela função de controlar remotamente o computador precisa de uma seção com tráfego confiável e orientada a conexão já que se necessita de pouca latência para realizar o controle de uma forma adequada.

3.9.1.4 Prova Enviando Arquivo

Usando NetMeeting de MICROSOFT, enviamos um arquivo de aproximadamente 250MB desde o PC2 até o PC1. A transferência demorou aproximadamente 827 segundos. Analisando o que estava acontecendo ao nível de protocolos encontramos o seguinte:

O tráfego registrou 220035 *frames* e aproximadamente 219344756 bytes, com uma média de 266,311 pacotes por segundo e uma média de 996,863 bytes por pacote.

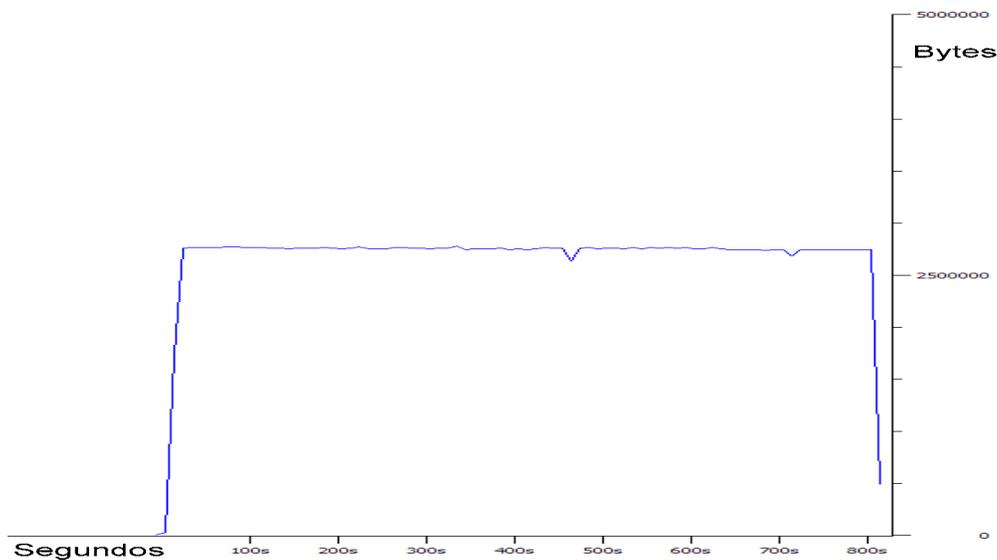


Figura 35: Prova Enviando Arquivo

Encontramos que para a sessão se usaram os seguintes protocolos; ARP (0.0018%), BROWSE (0.0009%), DCERPC (0.0004%), IGMP (0.0013%) NBNS (0.05%), Q.931 (0.0054%), SSDP (0.0018), TCP (94.14%) e UDP (5.79%).

O DCERPC é um protocolo de nível aplicação que permite a certos aplicativos fazer processos de ligações remotas. É um protocolo da Microsoft.

O protocolo IGMP funciona como uma extensão do protocolo IP. Utiliza-se para realizar *multicast* IP, ou seja, quando o envio de dados a um endereço IP pode atingir múltiplos servidores de uma rede e/ou a todas as máquinas de uma subrede. Além de utilizar-se para passar informação, também se utiliza para estabelecer os membros da rede, passar informação deles e estabelecer rotas. Muitos outros protocolos fazem uso das funções IGMP dentro de suas especificações.

O SSDP; (Protocolo simples de descobrimentos de serviços) (SSDP) é um serviço de Windows. O serviço SSDP administra a recepção de anúncios de presença de dispositivos, mediante a atualização da memória cache e o envio das notificações aos clientes com petições de busca pendentes. O serviço SSDP também aceita o registro de devoluções de ligações de acontecimentos dos clientes, convertendo-as em petições de assinatura. Este serviço do sistema também oferece anúncios periódicos aos dispositivos do host. Atualmente, o serviço de notificação de eventos SSDP utiliza a porta TCP 5000. Em Windows XP *Service Pack 2*, baseia-se na porta TCP 2869 .

Ressaltamos que essa análise utilizando conexão óptica poderia ser feita com máquinas distantes até 1Km (para placa disponível MM/850nm; para placas MN/1300nm poderíamos ter até 5km); sem impacto de atraso.

3.10 Referências

- [3.1] IEEE Padrão-*Telecommunications and Information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific Requirements.—Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specification*, ANSI/IEEE Std. 802.3-2002, edição 2002.
- [3.2] IEEE 802.3 Grupo de Estudo EFM, “Ethernet PON (EPON)”. <http://www.ieee802.org/3/efm/>
- [3.3] A. S. Tanenbaum, *Redes de Computadores*. Editora Campus, Tradução da 3ª ed .
- [3.4] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, *Optical Networks: Practical Perspective*, Morgan Kaufmann Publisher, 2002.
- [3.5] S. C. Grady, *The book on FTTX From Design To Deployment: A Practical Guide To FTTX Infrastructure*. ADC Telecommunications INC, 2005.
- [3.6] S. Choi, “Multicasting in EPON”. http://www.ieee802.org/3/efm/public/comments/d3_1/pdfs/choi_p2mp_1_0304.pdf USA, Março 2004.
- [3.7] G. Kramer e A. Maislos, “LaserControl problem statement”. http://www.ieee802.org/3/efm/public/sep03/p2mp/kramer_1_0903.pdf. Itália, Setembro 2003.
- [3.8] ITU-T G.975, *Forward Error Correction for Submarine Systems*. Série G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks. Outubro de 2000.
- [3.9] Ethereal Software, Inc, “Ethereal: protocol analysis”. <http://www.etherealsoft.com>

4. Comparação entre GPON e EPON

Encontrar a tecnologia correta para cobrir a última milha de qualquer rede sempre foi um desafio para as empresas fornecedoras de serviços. Achar uma solução ótima pode ser um processo complexo com numerosos fatores interligando-se que precisam ser tomados em conta.

Um fator determinante no custo efetivo de uma rede FTTH é entender as características de desempenho da tecnologia PON (EPON, GPON). Características tais como: largura de banda, eficiência e *split ratio* (Razão de Divisão). Em capítulos anteriores encontram-se especificados com detalhe esses fatores.

Enquanto os promotores das Redes GPON argumentam que o padrão ITU está logrando a maturidade mais rapidamente que o padrão IEEE EPON, os defensores das redes EPON citam que a maioria do tráfego nas redes no mundo começa e termina sua vida como tráfego IP/Ethernet, deste modo, para que interpor mais um protocolo de encapsulamento nas redes?

No capítulo 4; *Comparação entre GPON e EPON*, vamos apresentar as diferenças entre as duas tecnologias e mostrar uma análise comparativo custo-benefício entre elas. Também apresentaremos testes experimentais feitos com um enlace ponto a ponto Gigabit Ethernet usando o analisador de protocolos ETHEREAL. Diferenças básicas entre GPON e EPON

4.1 Diferenças Básicas entre GPON e EPON

As duas tecnologias têm uma diferença bem marcada no aspecto da arquitetura. GPON fornece redes complexas em árvore da camada 2: baseadas no protocolo ATM e múltiplos protocolos para suportar a estrutura da tecnologia. EPON, usa simples redes da camada 2 utilizando IP para dados, voz e vídeo.

A estrutura das redes GPON é suportada mediante uma solução de transporte usando múltiplos protocolos (Ver Figura 36). Usando tecnologia ATM, geram-se circuitos virtuais que são provisionados por diferentes tipos de serviços e enviados desde a CO (*Central Office*) até usuários corporativos geralmente. Esse tipo de transporte oferece um serviço de alta qualidade. Os circuitos virtuais são gerados para cada tipo de serviço oferecido na rede. Adicionalmente, os equipamentos nas redes GPON precisam de algumas conversões de protocolos, segmentação, terminação do canal virtual (VC) e do protocolo ponto-ponto (PPP). Resumindo, a estrutura de rede GPON consiste de múltiplas redes da camada 2 sobre a mesma camada física. Cada rede tem um protocolo diferente [4.1].

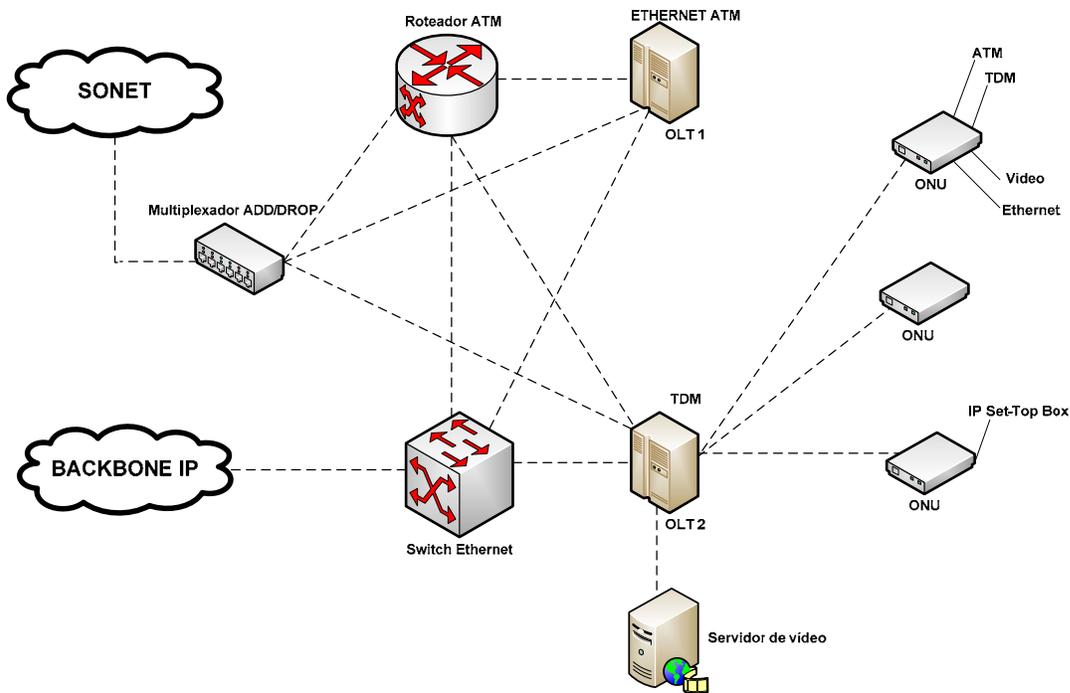


Figura 36: Estrutura da Rede GPON

EPON fornece conectividade para qualquer tipo de redes baseadas em IP [4.2]. As redes Ethernet estão expandidas pelo mundo, desde redes locais, redes nacionais, inclusive até *backbones* de redes internacionais (Ver Figura 37).

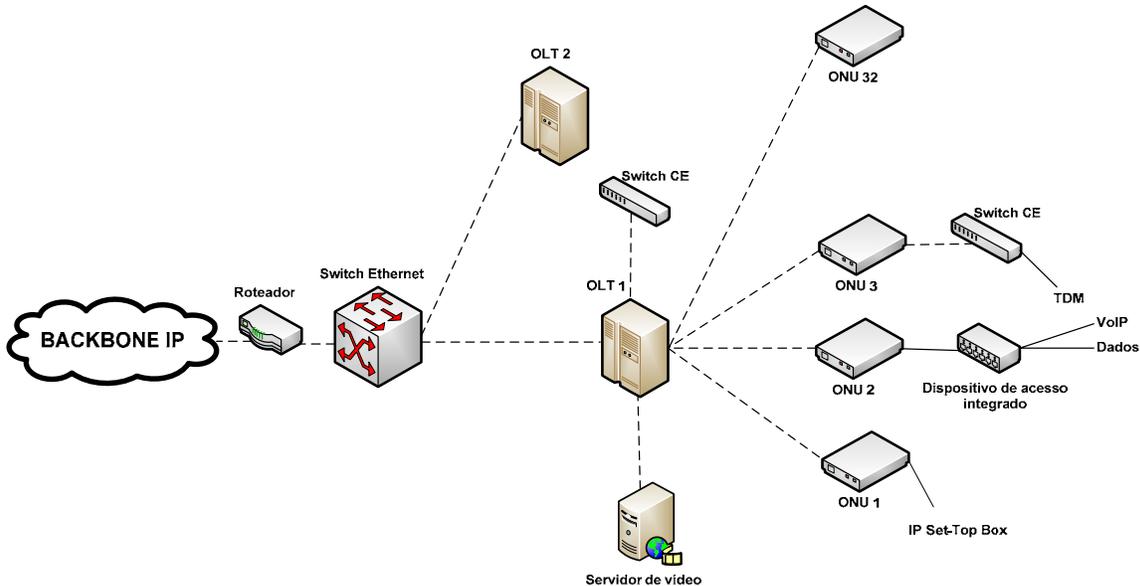


Figura 37: Estrutura da Rede EPON

Claramente podem-se apreciar então as diferenças entre GPON e EPON na camada 2. Não obstante, essas não são as únicas diferenças entre as duas tecnologias. Existem também diferenças em termos de eficiência, alcance, largura de banda, custo por usuário, gerenciamento, proteção entre outras.

4.1.1 Largura de Banda

As ofertas de banda variam entre os dois protocolos; GPON promete taxas de 1.25Gbps ou 2.5Gbps de *downstream*, e taxas escaláveis de *upstream* desde 155Mbps até 2.5Gbps. EPON oferece uma taxa simétrica de 1.25Gbps.

A eficiência dos sistemas EPON é pobre em comparação com GPON. A tecnologia EPON caracteriza-se por extensos cabeçalhos que provocam baixa eficiência e, conseqüentemente, menor número de bits de carga útil (*payload*) contra soluções GPON.

As duas tecnologias suportam televisão por cabo (CATV), o que demanda altas taxas na direção de *downstream* para o serviço de vídeo.

4.1.2 Alcance

Para as duas tecnologias, a limitação prática depende do orçamento disposto para o enlace óptico [4.3]. Com o alcance especificado para as duas redes de aproximadamente 20Km, a diferença da razão de divisão dos *splitters* ópticos e do número de unidades ópticas de rede (ONU) suportadas por cada OLT, são dois fatores que convertem-se em ponto de diferença para as duas tecnologias.

GPON oferece suportar até 128 ONU. Com o padrão EPON, segundo a amplitude do LASER, a tecnologia tipicamente pode atender até 32 ONU por cada OLT ou alguns casos 64 usando FEC (Ver secção 3.8).

4.1.3 Sistema de Gerenciamento

EPON requiere um simples sistema de gerenciamento, enquanto GPON demanda três sistemas de gerenciamento para os três protocolos de camada 2 que precisa. Fator que significa para EPON um menor custo na rede. Além disso, EPON não precisa de conversões de múltiplos protocolos, convertendo-se em outro fator de redução de custo na Rede.

4.1.4 Segurança e Proteção

O processo de encriptação AES (*Advanced Encryption Standard*) faz parte do padrão ITU-T nas redes GPON. Contudo, a encriptação na GPON realiza-se somente no sentido *downstream*.

Nas redes EPON, o mecanismo de encriptação não está definido no padrão. Alguns vendedores de EPON utilizam também AES, ademais o processo de encriptação nas redes EPON realiza-se nos dois sentidos de transmissão; *downstream* e *upstream*.

O serviço de OAM (Operação, Administração e Gerenciamento) também está presente nas duas tecnologias; GPON utiliza PLOAM+OMCI, ou seja, PLOAM (*Physical Layer Operations, Administration and Maintenance*): operações da camada física,

administração e manutenção, mais OMCI (*Open Manage Client Instrumentation*): instrumentação e controle aberto para o cliente. EPON usa o OAM definido para Ethernet.

4.1.5 Quantidade de Usuários por PON

O padrão IEEE 802.3ah EPON, suporta somente dois tipos de ODN: tipo A (5dB até 20dB de perdas) e tipo B (10dB até 25dB de perdas), oferecendo serviço até 32 usuários, enquanto o padrão GPON suporta também ODN tipo C (15dB até 30dB de perdas). A ODN tipo C permite às redes PON estender-se além dos 20Km atendendo até 64 ONT.

Utilizar redes EPON permite aos vendedores eliminar elementos complexos e caros das redes ATM e SONET simplificando-as deste modo, reduzindo consideravelmente os custos na rede.

4.1.6 Escalabilidade e Flexibilidade

IEEE EPON suporta somente uma única taxa simétrica de bits; 1,25Gbps. O padrão GPON é mais flexível e escalável, como já se falou em capítulos anteriores, GPON permite taxas de *downstream* de 1,25Gbps e 2,5Gbps e taxas de *upstream* desde 155Mbps até 2,5Gbps. As duas tecnologias estão enfocadas para atender o mercado das redes de acesso, onde é bem conhecido que o tráfego daquelas redes é assimétrico entre as taxas de baixada e subida, e não tem necessidade de ter uma taxa de 1,25Gbps de *upstream*. Enquanto GPON permite ao vendedor configurar as taxas de acordo às necessidades reais e atuais. Mecanismo que não pode ser realizado nas redes EPON. Isto não teria sido um problema, se o custo da alta taxa tem sido insignificante. Mas, infelizmente, não é esse o caso[4.4].

4.1.7 Eficiência de Cada Padrão

As duas tecnologias usam um cabeçalho fixo que é adicionado para transmitir dados do usuário na forma de um pacote. Na EPON os dados são enviados em pacotes de comprimento variável até 1500 bytes segundo o padrão IEEE 802.3 Ethernet. Na GPON os dados são enviados em células fixas de 53 bytes (5 bytes de cabeçalho), segundo o especificado pelo protocolo ATM. Este formato faz as redes GPON ineficientes para

carregar o formato IP. Para GPON carregar tráfego IP precisa dividir os pacotes de acordo ao padrão de 53 bytes. O processo é complexo e consome tempo, adicionando custos à *Central Office* e aos usuários. Além disso, 5 bytes de banda são desperdiçados cada 48 bytes, gerando um pesado cabeçalho que é conhecido como “imposto de célula ATM” (esse é o caso para redes GPON que usam o modo de encapsulamento ATM, usando o modo GEM, o imposto de célula ATM não se aplica).

Pelo contrário, usando pacotes de comprimento variável, Ethernet foi feito para transportar tráfego IP e reduz significativamente o cabeçalho gerado por ATM. Na próxima seção faremos ênfases na eficiência de cada rede, GPON e EPON.

4.2 Eficiência das Redes GPON e EPON

A eficiência de rede normalmente faz referência à eficiência de *throughput* ou sua utilização. A utilização é uma medida de quantos dados de usuário (dados da camada de aplicação) a rede pode transportar em uma unidade de tempo. A eficiência de utilização é uma proporção entre a máxima utilização e a taxa de transmissão da rede. Possivelmente, o modo mais fácil de calcular a eficiência é achar os componentes do cabeçalho associados ao processo de encapsulamento da informação e planejamento de alocação de banda.

4.2.1 Eficiência na GPON

Para analisar a eficiência na GPON primeiro apresentaremos uma pequena análise sobre o cabeçalho na transmissão no canal de distribuição (*downstream*), depois faremos o mesmo para a transmissão no canal de retorno (*upstream*).

4.2.1.1 Cabeçalho na Transmissão no Canal de Distribuição

Partindo de um sistema GPON de 16 ONUs. O comprimento constante do cabeçalho pode ser obtido adicionando todos os componentes requeridos no campo *PCBd*, logrando como resultado 154 Bytes (26+16x8).

O método GEM permite fragmentação de pacotes, onde a parte de carga útil de *downstream* nunca terá um *slot* remanescente, desta maneira, assumindo um tráfego pesado na rede, onde pelo menos temos um pacote pendente no *buffer* na OLT para ser transmitido

ao mesmo tempo em que se recebe o *slot* para a transmissão destinada para certa ONU. Nesse cenário, unicamente o cabeçalho adicional será devido exclusivamente ao método GEM sobre dados com comprimento variável tendo um valor de 5 Bytes por datagrama, como foi especificado na seção 2.7.1.

O número de datagramas por seção de carga útil pode ser estimado conhecendo o comprimento médio de uma distribuição de pacotes. Por exemplo, para uma média de 655 bytes e 511 bytes para CATV nas direções de *downstream* e *upstream* respectivamente [4.7]. A porcentagem de cabeçalho na transmissão de *downstream* para os valores anteriores foi de 1.55% e 1.76% respectivamente.

4.2.1.2 Cabeçalho na Transmissão no Canal de Retorno

Partindo do sistema anterior para o canal de distribuição (16 ONUs), o comprimento constante do cabeçalho é de 136 bits (17 bytes). Assumindo que temos disponíveis 19.440 bytes durante um *slot* de transmissão e são atendidas as 16 ONUs, então contamos com 1215 bytes para cada ONU. Além disso, 21 bytes são alocados para o cabeçalho de *upstream* deixando 1198 bytes para a carga útil. Resultados mostram que para a distribuição de pacotes para CATV, são necessários uma média de três pacotes para atender a parte de carga útil anterior, por tanto gerando 15 bytes de cabeçalho devido ao método GEM. Em total, cada ONU terá aproximadamente 32 bytes de cabeçalho por cada *slot* de transmissão na direção de *upstream*, ou seja, 2,63% de eficiência. Assumindo que a estrutura da GPON apresenta condições físicas variáveis cada *frame* de *upstream* será equipado com um campo de nivelção de potência de 120 bytes, produzindo o incremento de 32 bytes a 152 bytes, resultando uma eficiência do canal em 12,51%. O cabeçalho na transmissão no canal de retorno depende de muitos fatores como: qualidade do canal de fibra, tipo e implementação do algoritmo DBA, implementação da rede.

4.2.2 Eficiência na EPON

A eficiência de EPON depende de muitos parâmetros, tais como a distribuição do tamanho do pacote, a configuração da alocação de banda, e da velocidade do LASER e dos circuitos de relógio, entre outras. É, por isso, que a análise da eficiência é uma aproximação

ao comportamento real da rede EPON. Nesta seção, tentamos identificar todos os parâmetros que afetam a eficiência e os valores escolhidos destes parâmetros

O cabeçalho do processo de encapsulamento em Ethernet origina-se da adição de 8bytes do *frame* preâmbulo, 14bytes do cabeçalho Ethernet e 4bytes do campo FCS. Adicionalmente, pelo menos 12bytes para o espaço entre os *frames* transmitidos (IFG: *Inter Frame Gap*). Por tanto o cabeçalho total por cada *frame* é constante é igual a 38bytes. Este cabeçalho de encapsulamento não é específico da EPON, mas é comum para as redes Ethernet.

O valor médio do cabeçalho do processo de encapsulamento depende da distribuição dos comprimentos dos pacotes. Para nosso trabalho, tomamos as distribuições apresentadas nas referências [4.7] e [4.8].

Usando a seguinte equação, pode-se encontrar o valor médio do cabeçalho:

$$\overline{\text{cabeçalho}} = \frac{\sum_s E(s) \times f(s) - \sum_s s \times f(s)}{\sum_s E(s) \times f(s)} \quad (4.1)$$

Onde:

- s=comprimento do *payload*.
- f=função de distribuição de probabilidade
- E(s)=encapsulamento para Ethernet

Usando a distribuição de pacotes da referência [4.7], encontramos que o cabeçalho de cada *frame* encapsulado de Ethernet é de 7.42%, menor que o cabeçalho das células ATM que é de 13.22%.

4.2.2.1 Cabeçalho por Agendamento

O cabeçalho por agendamento em EPON compõe-se de um cabeçalho da mensagem de controle, um cabeçalho de guarda de banda, um campo de descobrimento de cabeçalho e um cabeçalho de delineamento do *frame*. Alguns parâmetros que afetam o cabeçalho, tais como tempo do ciclo ou a frequência das tentativas de descobrimento estão fora do padrão IEEE802.3ah.

O cabeçalho da mensagem de controle representa às perdas de largura de banda devido ao uso das mensagens de controle GATE e REPORT. A extensão do cabeçalho depende do número de ONUs e do tempo do ciclo (tempo que demora a ONU em receber a mensagem GATE e enviar a mensagem REPORT). Assumindo que o algoritmo de agendamento precisa somente uma mensagem GATE e uma mensagem REPORT durante um tempo do ciclo. A recomendação ITU-T G.114 especifica um atraso de 1.5ms para o tráfego de voz em redes de acesso. Por tanto se o máximo atraso não supera os 1.5ms, o tempo do ciclo deve ser 1ms, ou para ter uma margem de segurança deve ser 750µs.

O cabeçalho da mensagem de controle calcula-se da seguinte forma:

$$\text{cabeçalho de controle} = \frac{(\text{comprimento da mensagem}) \times (\text{ONUs})}{(\text{tempo do ciclo}) \times (\text{taxa de EPON})} \quad (4.2)$$

Onde:

- Comprimento da mensagem = comprimento da mensagem GATE ou REPORT incluindo o preâmbulo e IFG.
- ONUs = número de ONUs na rede.
- Taxa de EPON = 1,25Gbps.

Para um ciclo de 1ms, obtemos 1.08% de cabeçalho para um sistema de 16 ONUs e 2.15% para um sistema de 32 ONUs. Se o ciclo é reduzido a 750µs, o cabeçalho alcança 1.43% e 2.87% para sistemas de 16 e 32 ONUs respectivamente. Assumindo que o algoritmo de agendamento usa a mesma quantidade de mensagens GATE e REPORT, encontramos o mesmo cabeçalho de controle para os canais de distribuição e retorno.

Para o cabeçalho de guarda de banda, definem-se guardas de banda como intervalos de tempo durante os quais as ONU ligam e desligam o LASER e a ONT opera o controle de ganho automático e sincroniza o relógio. As guardas de banda estão presentes somente no canal de retorno e dependem dos parâmetros PMD e PMA como tempo para ligar e desligar o LASER (T_{on} e T_{off}), tempo de controle de ganho automático (T_{AGC}), tempo do relógio e recuperação de dados (T_{CDR}) e tempo de alinhamento do código de grupo (T_{CGA}).

Considerando o pior caso, onde T_{AGC} e T_{CDR} são iguais a 400ns (Valor máximo permitido pelo padrão IEEE 802.3ah). T_{on} e T_{off} têm um valor fixo de 512ns e o T_{CGA} é 32ns.

O cabeçalho de guarda de banda (CGB) calcula-se da seguinte forma:

$$CGB = \frac{(T_{ON} + T_{zona_morta} + T_{AGC} + T_{CDR} + T_{CGA}) \times (ONUs)}{T_{ciclo}} \quad (4.3)$$

Onde:

- O tempo de zona morta é o intervalo de tempo entre o momento quando o LASER é desligado e o momento em que se liga de novo.

Para um ciclo de 1ms, obtemos 2.76% de cabeçalho para um sistema de 16 ONUs e 5.53% para um sistema de 32 ONUs. Se o ciclo é reduzido a 750µs, o cabeçalho alcança 3.69% e 7.37% para sistemas de 16 e 32 ONUs respectivamente.

O cabeçalho de descobrimento representa as perdas de largura de banda devido à alocação periódica da janela de descobrimento. Para a análise assumimos um comprimento de 300µs para a janela de descobrimento e um algoritmo que realiza periodicamente o descobrimento sem ter em conta as ONUs registradas. O período de descobrimento pode ser muito longo, 1 segundo ou mais. Com um período de 1s, o cabeçalho é igual a 300µs, ou seja, 0,03%. O cabeçalho afeta somente o canal de retorno, devido a que as janelas de transmissão são alocadas exclusivamente na transmissão de *upstream*.

O cabeçalho de delineamento do *frame* está associado ao fato que está presente a probabilidade de que os *frames* de tamanho variável não sejam capazes de ocupar completamente o tamanho fixo do ciclo. Tendo em conta a distribuição da referência [4.7], para um ciclo de 1ms, o cabeçalho é igual a 0.48%. Reduzindo o ciclo a 750µs, o cabeçalho é igual a 0.63%.

A Tabela 8: faz um resumo de vários componentes de cabeçalho para o canal de *upstream*.

	Cabeçalho mínimo	Cabeçalho máximo
Cabeçalho da mensagem de controle	1.08%	2.87%
Cabeçalho de guarda de banda	1.33%	6.14%
Cabeçalho de descobrimento	0.03%	0.03%
Cabeçalho de delineamento do frame	0.48%	0.63%
Cabeçalho total por agendamento no canal de retorno	2.92%	9.67%

Tabela 8: Valores do Cabeçalho para o Canal de *Upstream*

No canal de distribuição, somente o cabeçalho da mensagem de controle está presente.

	Cabeçalho mínimo	Cabeçalho máximo
Cabeçalho da mensagem de controle	1.08%	2.87%
Cabeçalho total por agendamento no canal de distribuição	1.08%	2.87%

Tabela 9: Valores do Cabeçalho para o Canal de *Downstream*

Deste modo, na direção de *upstream* o cabeçalho total por agendamento pode tomar qualquer valor entre 2.92% e 9.67%. Ou seja, a eficiência na EPON varia entre 90.33% e 97.08%, comparada com um enlace ponto a ponto GbE. Na direção de *downstream* o cabeçalho total por agendamento pode tomar qualquer valor entre 1.08% e 2.87%. Ou seja,

a eficiência na EPON varia entre 97.13% e 98.92%, comparada com um enlace ponto a ponto GbE.

4.2.2.2 Eficiência Absoluta na EPON

Para encontrar a eficiência absoluta da EPON temos que ter em conta a eficiência de encapsulamento (92.58%). Simplesmente fazendo o produto com a eficiência no agendamento.

	<i>Downstream</i>	<i>Upstream</i>
Eficiência absoluta mínima	89.9229%	83.6257%
Eficiência absoluta máxima	91.5801%	89.8766%
Mínimo <i>Throughput</i> (utilização)	1124.03Mbps	1045.32Mbps
Máximo <i>Throughput</i> (utilização)	1144.75Mbps	1123.45Mbps

Tabela 10: Eficiência Absoluta na EPON

As mínimas e máximas utilizações se encontram fazendo o produto da eficiência absoluta pela taxa de transmissão na EPON (1250Mbps).

Os valores máximos na tabela anterior representam um sistema EPON com 16 ONUs, 96ns para os tempos de AGC e CDR e um tempo de ciclo de 1ms. Os valores mínimos são calculados para um sistema EPON com 32 ONUs, 400ns para os tempos de AGC e CDR e um tempo de ciclo de 750µs. Para todos os cálculos consideramos o cabeçalho e a eficiência na interface GMII. Temos que ter em conta o 20% de percentagem adicional gerado pela codificação de linha 8B/10B para a análise de custos [3.6].

4.3 Comparação Econômica entre GPON e EPON

As indústrias têm começado a implantar os serviços que fornecem as tecnologias PON com as redes FTTP (Fibra até os usuários). O padrão GPON tem sido acolhido na

América do Norte e Europa enquanto o padrão IEEE 802.3ah EPON foi escolhido no Japão. Independentemente dos méritos de qualquer tecnologia, a solução preferida provavelmente será a menos custosa. Com isto em mente, a continuação se apresentará uma simples comparação dos custos entre os padrões emergentes ITU-T GPON e IEEE EPON para uma determinada rede FTTP.

Da secção 4.1, se poderia pensar que a tecnologia GPON parece mais bem adaptada para aplicação em redes de operadora fornecendo suporte para O&M, interoperabilidade e segurança, todas as operações necessárias para redes de comunicações. No entanto, estes méritos técnicos, por si só, não podem resultar em um aval para GPON. Para acessar a rede, o custo final é o fator determinante. Assim, os resultados da comparação vão mostrar a viabilidade da tecnologia GPON frente à tecnologia EPON.

Nossa análise foi feita para atender a demanda de 10000 usuários. Tendo em conta que em uma zona urbana aproximadamente as casas ocupam uma extensão de 400m², os 10000 assinantes estariam localizados numa região de 5Km². Para o cenário proposto se assumirão as seguintes características para os cálculos dos custos.

A eficiência da rede GPON será estabelecida em 93%, enquanto a eficiência da rede EPON será estabelecida em 70%. Ou seja, para GPON temos uma utilização de 2333Mbps e para EPON temos 896Mbps. Por simplicidade, o tipo de serviço oferecido não será considerado, mas sim a largura de banda por usuário. A razão de divisão gerada pelos *splitters* será a mesma para cada rede (32 ONTs). O preço para as OLTs será o mesmo, US\$ 1800, enquanto as ONT assumiremos US\$250 para GPON e US\$200 para EPON.

Ainda que a taxa de *downstream* na GPON seja bem maior que EPON, no custo não deveria ter muita importância devido a que o LASER para o tráfego de *upstream* tem a mesma taxa de transferência que na GPON. Baseados no uso de esses componentes comuns, o receptor na ONT não deveria ter incrementos de custo consideráveis porquanto o detector PIN seria praticamente o mesmo, ainda que GPON seja otimizada para 2.5Gbps. Também assumiremos que o custo no cabeado será o mesmo para as duas tecnologias, o preço nas ONTs não é o mesmo porque GPON suporta serviços TDM (POTS, E1/T1), oferecendo uma característica extra comparada com a rede EPON.

A quantidade de OLTs requerida para uma rede GPON é menor que para a rede EPON, devido a sua maior capacidade de alcançar mais usuários, sua maior eficiência e taxa de transmissão. Para nosso cenário de 10000 usuários, oferecendo uma taxa de 100Mbps, a rede GPON precisa de 435 OLTs para atender a demanda, enquanto a rede EPON precisa de 1250 OLTs, significando em uma relação de 2.87:1 de EPON contra GPON, representando uma diferença de US\$1.4 milhões. A Tabela 11: mostra a quantidade de OLTs e ONTs necessárias em nosso cenário [4.5].

Largura de Banda por usuário (Mbps)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Quantidade de ONTs GPON por PON	32	32	32	32	32	32	32	29	25	23
Quantidade de OLTs GPON por PON	313	313	313	313	313	313	313	345	400	435
Quantidade de ONTs EPON por PON	32	32	29	22	17	14	12	11	9	8
Quantidade de OLTs EPON por PON	313	313	345	455	589	715	834	910	1112	1250
Razão entre EPON OLT e GPON OLT	1.00	1.00	1.10	1.45	1.88	2.28	2.66	2.64	2.78	2.87

Tabela 11: Dimensionamento das Redes GPON e EPON

Como se observa, o número de OLTs necessárias nas redes EPON é bem maior que para as redes GPON, convertendo-se em uma vantagem econômica visível. A Figura 38 e a Figura 39 representam o numero de ONTs e OLTs necessárias para dimensionar nosso cenário de 10000 assinantes.

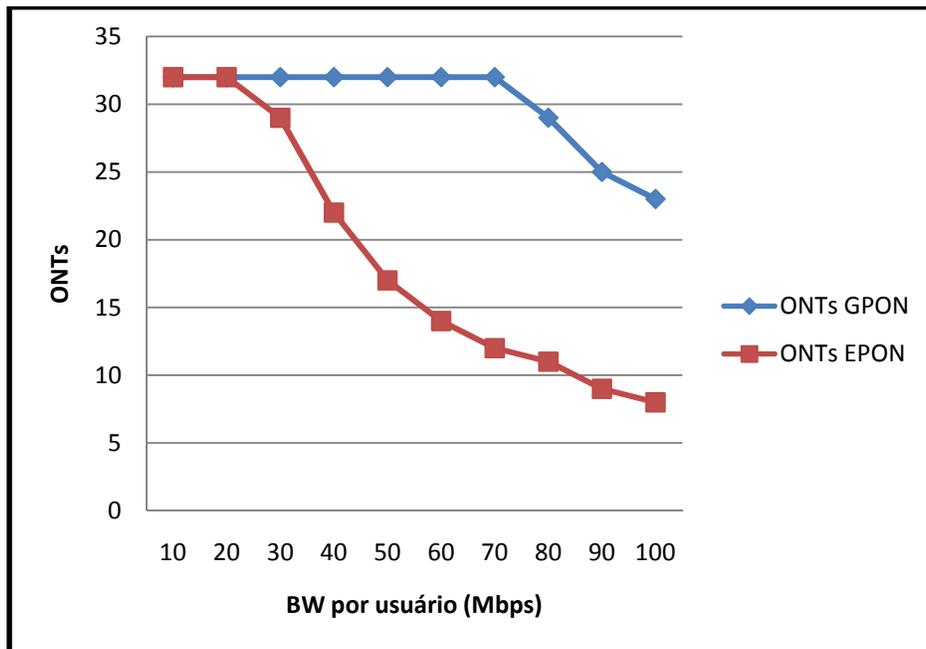


Figura 38: Quantidade de ONTs necessárias segundo a largura de banda por usuário.

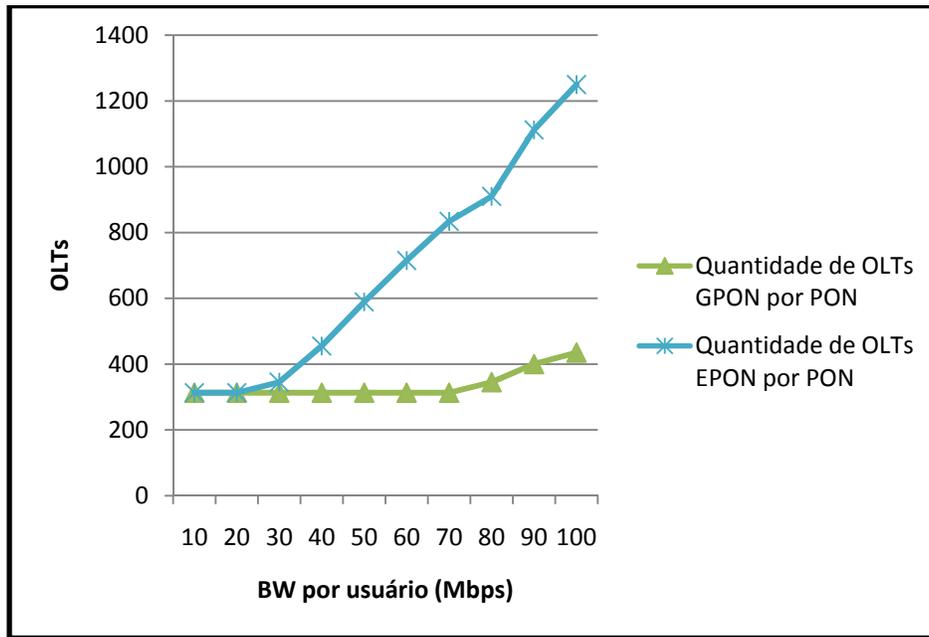


Figura 39: Quantidade de OLTs necessárias segundo a largura de banda por usuário.

Enquanto a largura de banda demandada pelo cliente aumenta, EPON rapidamente esgota seus recursos. A figura mostra o custo geral das redes GPON/EPON em função da largura de banda requerida pelo assinante [4.6].

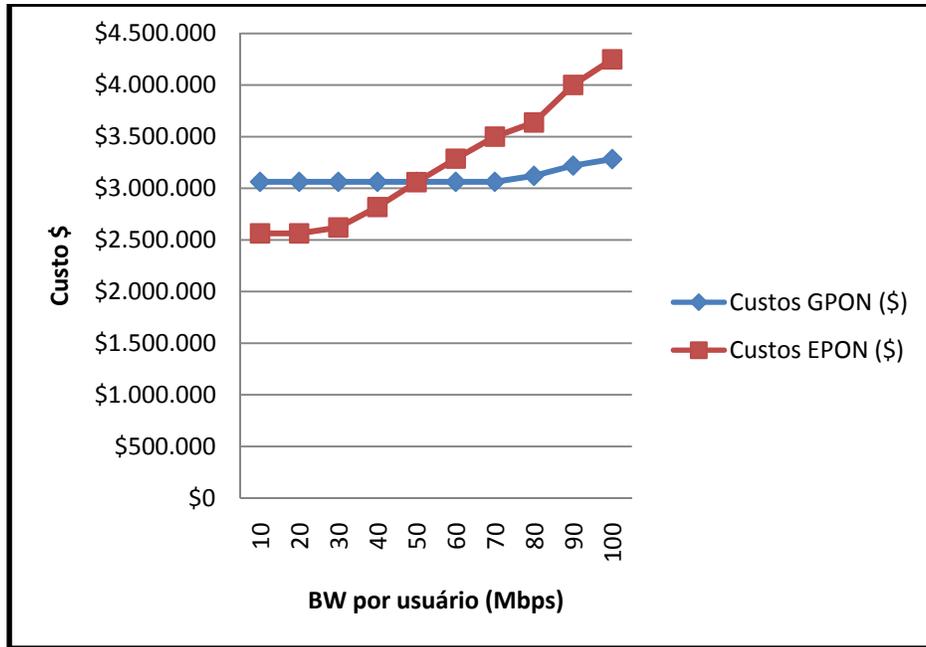


Figura 40: Custo Total das Redes GPON e EPON

Conhecendo a vantagem econômica que implica ter a menor quantidade de OLTs nas redes GPON, podemos calcular a sensibilidade do custo das ONTs na GPON, baseados no dinheiro poupado. Pode ser calculado baseado no dinheiro poupado, aplicando o valor contra o número total de ONTs na rede. Deste modo, para um total poupado de US\$1.4 milhões devido ao menor número de OLTs na GPON para usuários com um serviço de 100Mbps, US\$1.4 milhões podem ser gastos em 10000 ONTs para obter um custo equivalente como EPON. Assim, a ONT na GPON pode custar US\$146 na ordem de ter o mesmo custo total da rede. Ver Figura 41:

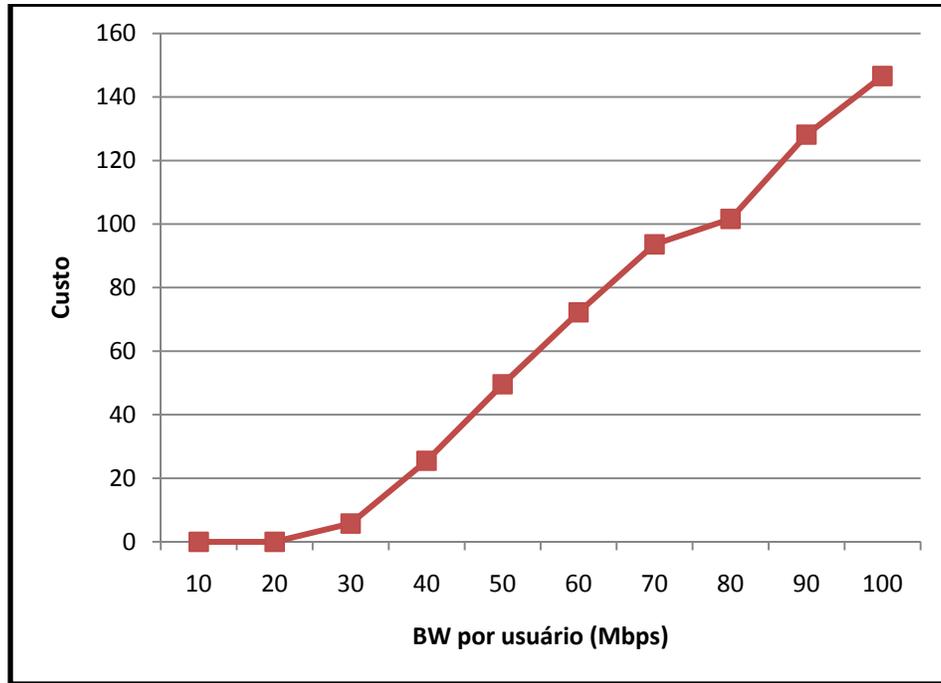


Figura 41: Sensibilidade do Custo da ONT na GPON com Relação a EPON

A poupança lograda é devida ao número de OLTs, assim, a sensibilidade do custo para a OLT na GPON torna-se um fator importante. A sensibilidade da rentabilidade do custo da OLT na GPON pode ser determinada pela aplicação da diferença entre os equipamentos da GPON e EPON aplicada ao número de OLTs na GPON. A Figura 42 mostra os preços necessários para igualar os custos totais na rede com a respectiva rede EPON.

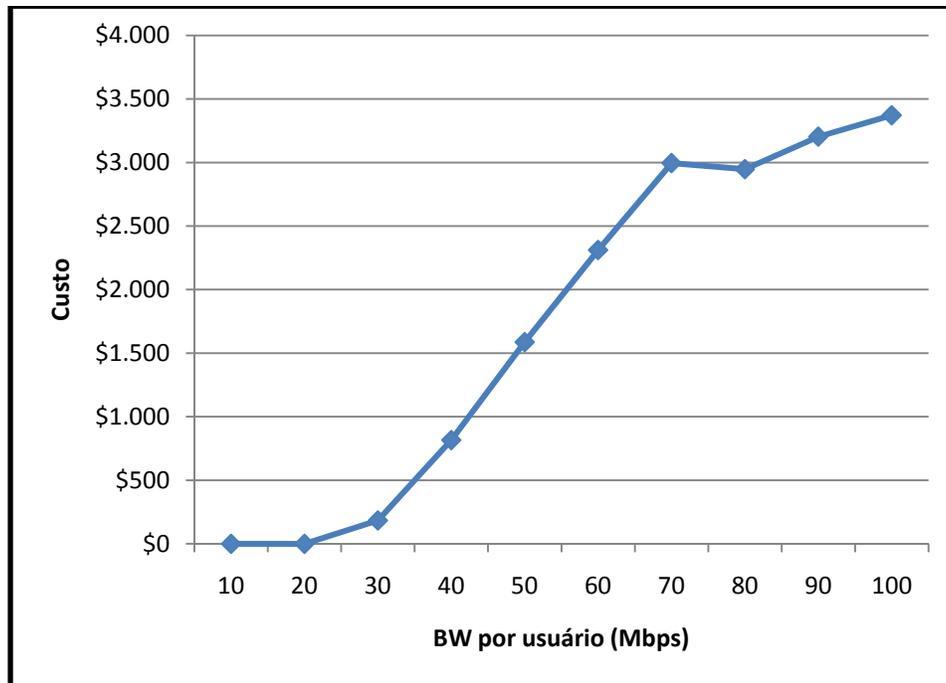


Figura 42: Custo da OLT na GPON para Igualar o Custo com a Rede EPON

Esta análise simples para uma determinada rede FTTP deixa em destaque uma vantagem devido ao custo das redes GPON sobre EPON. Isto é devido ao maior razão de divisão na GPON, à taxa de transmissão maior que em EPON e à eficiência na largura de banda, o que resulta na redução de OLTs de mais de um fator de mais de 2 sobre EPON. Ainda que não faça parte desta análise, isto se traduz em poupança adicional no custo do espaço necessário e reduziu a potência requerida pela *Central Office*.

A recomendação ITU-T G.984 GPON fornece transporte de dados tanto Ethernet como TDM, proporcionando uma boa relação custo-eficácia na tecnologia PON que pode ser utilizada tanto para serviços residenciais como empresariais.

Tal como acontece na recomendação UIT-T G.983 BPON, GPON também promete interoperabilidade nos equipamentos através da rede FSAN e de iniciativas da ITU. Isso permite implantações de redes PON onde vários vendedores de OLTs e ONTs podem ser misturados e combinados em uma rede como é feito com a rede BPON. Permite também o fornecimento de baixo custo por parte dos vendedores CPE (*Customer Premises*

Equipment: Equipamento para os usuários) devido ao elevado número de ONTs na PON, como é feito na indústria DSL, permitindo, assim, mais baixo custo de implantação PON.

Ao incrementar a largura de banda no consumidor de 10Mbps até os 100Mbps requeridos para IPTV, GPON oferece uma significativa vantagem de custo e de desempenho sobre a EPON e mais quando serviços como SDTV e HDTV sejam introduzidos na rede.

Baseado no cenário anterior é possível alcançar uma melhoria de duas a três vezes nos ingressos por cada PON, utilizando tecnologia GPON em lugar de usar EPON. O desenhista de redes deve levar em consideração o fato que se precisam menos sistemas e menos árvores PON usando GPON, assim, reduzindo significativamente as despesas operacionais para a rede na base dela. Além disso, o aumento da flexibilidade pode ser introduzido com GPON usando opcionalmente o longo alcance ótico para aumentar áreas de serviço, adicionando diversos caminhos de proteção para a confiabilidade da rede de fibra, e permitindo ativar a criptografia para proporcionar vantagens que podem simplificar a rede sem a necessidade de adicionar mais equipamentos.

4.4 Referências

- [4.1] ITU-T Recommendation G.984.1. “*Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General characteristics*”, Março 2003.
- [4.2] IEEE Padrão-*Telecommunications and Information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific Requirements.—Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specification*, ANSI/IEEE Std. 802.3-2002, edição 2002.
- [4.3] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, *Optical Networks, A Practical Perspective*, Morgan Kaufmann, 2002.
- [4.4] B. Mukherjee, *Optical Communication Networks*, McGraw-Hill, New York, 1997.
- [4.5] M. K. Weldon and F. Zane, “*The economics of fiber to the home revisited*”, Bell Labs Technical Journal, Vol. 8, no 1. 2003.
- [4.6] ITU-T Recommendation G.911. “*Parameters and calculation methodologies for reliability and availability of fiber optic systems*” 1993.
- [4.7] D. Sala, A. Gummalla, “*PON Functional requirements: services and performance*”, Julho 2001.
- [4.8] K.C. Claffy, G. Miller, K. Thompson, “*The nature of the beast: Recent traffic measurements from an Internet backbone*”, Julho 1998.

5. Conclusão

De acordo com o planejamento, realizou-se neste trabalho um estudo teórico das principais redes de acesso, fazendo ênfase nas redes PON. Foram abordadas também as arquiteturas, possíveis configurações, especificações, requisitos, métodos de encapsulamento da informação, protocolos, eficiência das redes GPON e EPON

Depois de finalizado os estudos teóricos e compreendidas todas as principais características de funcionamento relevantes às redes GPON e EPON, mostramos as diferenças entre as duas tecnologias, como o alcance, a largura de banda oferecida, o sistema de gerenciamento, a segurança, a proteção, a quantidade de usuários por PON, a escalabilidade, a flexibilidade entre outras. Também foram feitos estudos que envolvem os cálculos para encontrar a eficiência de cada padrão adotada neste trabalho.

Também realizamos um estudo experimental no laboratório de um enlace ponto a ponto Gigabit Ethernet, analisando desde a perspectiva do modelo OSI, observamos todos os protocolos envolvidos em um processo de transmissão, desde um teste de rede com o comando PING até a transferência de um arquivo. A análise foi feita com o programa analisador de protocolos chamado Ethereal, que é um software livre disponibilizado na internet, que nos permite obter resultados que foram plotados e analisado no capítulo 4. Foi importante o estudo experimental porque encontramos resultados reais de transmissões a taxas elevadas via fibra óptica usando um protocolo muito usado no trabalho, e deste modo abrimos passo para futuros trabalhos e implementações experimentais no laboratório, aspecto muito importante que pode ir acompanhado de estudo de simulações.

Nos resultados dos custos das redes, utilizamos um cenário de 10000 assinantes, onde usando as eficiências de cada rede (GPON e EPON) encontramos resultados de tipo financeiros muito importantes que foram plotados no capítulo 4. Esses resultados são cruciais porque definitivamente o fato mais importante para o desenvolvimento e massificação de uma tecnologia atualmente é o custo.

Tendo em conta todos os fatores anteriormente mencionados em nosso estudo, encontramos que a infra-estrutura da rede GPON é mais robusta, tem mais capacidade e tem uma leve vantagem sobre a rede EPON. Como encontramos nos resultados, atualmente poderíamos planejar uma rede EPON para oferecer taxas de *downstream* de até 40Mbps e teríamos uma leve vantagem em termos de custos sobre a GPON, mas se queremos oferecer taxas acima de 40Mbps é mais rentável planejar uma GPON.

Depois de nosso estudo e análise crítica recomendamos para o planejamento de uma rede PON o seguinte:

Se os recursos econômicos não são grandes e as taxas oferecidas não superam os 40Mbps por usuário, recomendamos desenvolver uma rede PON, tendo em conta a rede não tem as capacidades de escalabilidade que tem a GPON.

Se as taxas oferecidas pretendem-se estar acima de 40Mbps, recomendamos indubitavelmente usar redes GPON, devido a sua robustez, sua escalabilidade, sua capacidade de aceitar serviços TDM e o fator mais importante, custo relativo menor comparado com EPON para esse tipo de taxas de transmissão.

Atualmente as redes GPON tem uma margem de vantagem em termos de engenharia e econômicos sobre as redes EPON, ainda que a maior parte do tráfego nas redes do mundo seja IP, ideal para Ethernet PON.

5.1 Trabalhos Futuros

Para os próximos trabalhos pretende-se continuar analisando as plataformas EPON e GPON, já realizado no presente trabalho, porém abarcando também as redes 10EPON, procurando encontrar suas melhoras sobre sua antecessora EPON e possíveis vantagens sobre as redes GPON. Pretendem-se também, melhorar o estudo experimental, adquirindo

dispositivos que permitam fazer mais testes como realizar a conexão com a rede KYATERA, aproveitando o ponto de rede que temos em nosso laboratório. Também adquirir dispositivos da camada 2 e 3 com interfaces ópticas para desenvolver diferentes arquiteturas de redes ópticas no laboratório, aproveitando as placas de rede e cabos de fibra existentes.

Pretende-se também aperfeiçoar o estudo referente à eficiência das redes PON com utilização de softwares licenciados especializados em análise de redes ópticas.

Atualmente as redes ópticas passivas Gigabit (GPON) estão chegando ao mercado latino-americano, esperamos que após nosso trabalho, estar capacitados para assumir o desafio que será a massificação deste tipo de redes em nossas cidades.

Anexo A

Ethereal

Para observar e analisar o comportamento dos protocolos de rede é preciso dispor de uma ferramenta capaz de monitorar o tráfego na rede e mostrá-lo numa forma legível. As ferramentas que capturam e mostram o tráfego existente numa interface de rede se denominam analisadores de protocolos de rede, analisadores de pacotes, "packet sniffers" ou simplesmente "sniffers" (do inglês sniff, olfatear). Para visualizar o tráfego os analisadores de protocolo colocam a placa de rede em modo promíscuo, uma modalidade onde é capturado todo o tráfego visível para a placa de rede. Numa rede Ethernet uma interface de rede em modo promíscuo pode ver todo o tráfego gerado por todas as equipes que compartilham o mesmo conjunto de cabos e concentradores (hubs). O modo promíscuo implica riscos evidentes de segurança, pelo que seu uso costuma limitar-se ao supervisor.

Ethereal é um analisador de protocolos com interface gráfica capaz de reconhecer muitos protocolos diferentes. Permite tanto revisar os pacotes de dados numa rede ativa como desde um arquivo de captura previamente gerado; é capaz de compreender diversos formatos de arquivo próprios de outros programas de captura.

Na Figura 43 observamos o entorno gráfico do Ethereal depois da captura de pacotes ao executar o comando PING.

Para iniciar a captura de dados, escolher nas opções Capture: Start (Capturar, Começo). Na janela de opções de captura deve fixar-se ao menos a interface sobre a que se quer realizar a captura. Os nomes variam segundo os sistemas operativos. Para capturar num arquivo deve indicar-se seu nome no quadro "Capture file(s)" da janela de Opções de Captura (Capture: Start abre esta janela). Estes arquivos podem ser examinados depois com o próprio Ethereal mediante a opção de File: Open. O tráfego já capturado pode gravar-se num arquivo escolhendo File: Print (Arquivo: Imprimir); esta opção grava em formato legível (texto). A janela de estado mostra em tempo real a quantidade de pacotes capturados. A captura se mantém até que se pressiona o botão Stop. Depois de uns instantes aparecem os pacotes capturados, tal qual se vê na imagem da janela principal. Se se ativou

a opção de atualizar lista de pacotes em tempo real ("Update list of packets in real time") estes se visualizam à medida que são capturados.

No. .	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1	0.000000	192.168.1.103	Broadcast	ARP	Who has 192.168.1.101? Tell 192.168.1.103
2	0.000184	192.168.1.101	192.168.1.103	ARP	192.168.1.101 is at 00:40:f4:8a:f7:7c
3	0.000191	192.168.1.103	192.168.1.101	ICMP	Echo (ping) request
4	0.000352	192.168.1.101	192.168.1.103	ICMP	Echo (ping) reply
5	1.000487	192.168.1.103	192.168.1.101	ICMP	Echo (ping) request
6	1.000695	192.168.1.101	192.168.1.103	ICMP	Echo (ping) reply
7	2.000497	192.168.1.103	192.168.1.101	ICMP	Echo (ping) request
8	2.000692	192.168.1.101	192.168.1.103	ICMP	Echo (ping) reply
9	3.000495	192.168.1.103	192.168.1.101	ICMP	Echo (ping) request
10	3.000753	192.168.1.101	192.168.1.103	ICMP	Echo (ping) reply
11	12.162977	192.168.1.103	192.168.1.255	NBNS	Name query NB WPAD.<00>

* Frame 1 (42 bytes on wire, 42 bytes captured)
 * Ethernet II, Src: 00:40:f4:b7:c4:3e, Dst: ff:ff:ff:ff:ff:ff
 * Address Resolution Protocol (request)

```

0000  ff ff ff ff ff ff 00 40  f4 b7 c4 3e 08 06 00 01  .....@ ...>...
0010  08 00 06 04 00 01 00 40  f4 b7 c4 3e c0 a8 01 67  .....@ ...>...g
0020  00 00 00 00 00 00 c0 a8  01 65  .....e
  
```

Figura 43: Janela Principal do Ethereal

Anexo B

Apresenta-se neste anexo, o tráfego após da captura dos pacotes. Deve-se notar que o texto descreve todo cenário da transmissão, e é o resultado gerado pelo programa Ethereal. Somente apresentaremos o resultado da captura de pacotes ao executar o comando PING considerando que como esse exemplo não existe a necessidade de mostrar as outras capturas.

Comando PING

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1	0.000000	192.168.1.103	Broadcast	ARP	Who has 192.168.1.101? Tell 192.168.1.103

Frame 1 (42 bytes on wire, 42 bytes captured)
 Ethernet II, Src: 00:40:f4:b7:c4:3e, Dst: ff:ff:ff:ff:ff:ff
 Address Resolution Protocol (request)

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
2	0.000184	192.168.1.101	192.168.1.103	ARP	192.168.1.101 is at 00:40:f4:8a:f7:7c

Frame 2 (60 bytes on wire, 60 bytes captured)
 Ethernet II, Src: 00:40:f4:8a:f7:7c, Dst: 00:40:f4:b7:c4:3e
 Address Resolution Protocol (reply)

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
3	0.000191	192.168.1.103	192.168.1.101	ICMP	Echo (ping) request

Frame 3 (74 bytes on wire, 74 bytes captured)
 Ethernet II, Src: 00:40:f4:b7:c4:3e, Dst: 00:40:f4:8a:f7:7c
 Internet Protocol, Src Addr: 192.168.1.103 (192.168.1.103), Dst Addr: 192.168.1.101 (192.168.1.101)
 Internet Control Message Protocol

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
4	0.000352	192.168.1.101	192.168.1.103	ICMP	Echo (ping) reply

Frame 4 (74 bytes on wire, 74 bytes captured)
 Ethernet II, Src: 00:40:f4:8a:f7:7c, Dst: 00:40:f4:b7:c4:3e
 Internet Protocol, Src Addr: 192.168.1.101 (192.168.1.101), Dst Addr: 192.168.1.103 (192.168.1.103)
 Internet Control Message Protocol

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
5	1.000487	192.168.1.103	192.168.1.101	ICMP	Echo (ping) request

Frame 5 (74 bytes on wire, 74 bytes captured)
 Ethernet II, Src: 00:40:f4:b7:c4:3e, Dst: 00:40:f4:8a:f7:7c
 Internet Protocol, Src Addr: 192.168.1.103 (192.168.1.103), Dst Addr: 192.168.1.101 (192.168.1.101)
 Internet Control Message Protocol

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
6	1.000695	192.168.1.101	192.168.1.103	ICMP	Echo (ping) reply

Frame 6 (74 bytes on wire, 74 bytes captured)
 Ethernet II, Src: 00:40:f4:8a:f7:7c, Dst: 00:40:f4:b7:c4:3e
 Internet Protocol, Src Addr: 192.168.1.101 (192.168.1.101), Dst Addr: 192.168.1.103 (192.168.1.103)
 Internet Control Message Protocol

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
7	2.000497	192.168.1.103	192.168.1.101	ICMP	Echo (ping) request

Frame 7 (74 bytes on wire, 74 bytes captured)
 Ethernet II, Src: 00:40:f4:b7:c4:3e, Dst: 00:40:f4:8a:f7:7c
 Internet Protocol, Src Addr: 192.168.1.103 (192.168.1.103), Dst Addr: 192.168.1.101 (192.168.1.101)
 Internet Control Message Protocol

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
8	2.000692	192.168.1.101	192.168.1.103	ICMP	Echo (ping) reply

Frame 8 (74 bytes on wire, 74 bytes captured)
 Ethernet II, Src: 00:40:f4:8a:f7:7c, Dst: 00:40:f4:b7:c4:3e
 Internet Protocol, Src Addr: 192.168.1.101 (192.168.1.101), Dst Addr: 192.168.1.103 (192.168.1.103)
 Internet Control Message Protocol

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
9	3.000495	192.168.1.103	192.168.1.101	ICMP	Echo (ping) request

Frame 9 (74 bytes on wire, 74 bytes captured)
 Ethernet II, Src: 00:40:f4:b7:c4:3e, Dst: 00:40:f4:8a:f7:7c
 Internet Protocol, Src Addr: 192.168.1.103 (192.168.1.103), Dst Addr: 192.168.1.101 (192.168.1.101)
 Internet Control Message Protocol

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
10	3.000753	192.168.1.101	192.168.1.103	ICMP	Echo (ping) reply

Frame 10 (74 bytes on wire, 74 bytes captured)
 Ethernet II, Src: 00:40:f4:8a:f7:7c, Dst: 00:40:f4:b7:c4:3e
 Internet Protocol, Src Addr: 192.168.1.101 (192.168.1.101), Dst Addr: 192.168.1.103 (192.168.1.103)
 Internet Control Message Protocol

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
11	12.162977	192.168.1.103	192.168.1.255	NBNS	Name query NB WPAD.<00>

Frame 11 (92 bytes on wire, 92 bytes captured)
 Ethernet II, Src: 00:40:f4:b7:c4:3e, Dst: ff:ff:ff:ff:ff:ff
 Internet Protocol, Src Addr: 192.168.1.103 (192.168.1.103), Dst Addr: 192.168.1.255 (192.168.1.255)
 User Datagram Protocol, Src Port: netbios-ns (137), Dst Port: netbios-ns (137)
 NetBIOS Name Service