



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – DEEE
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Redes Óticas Passivas: Tecnologias GPON e GEPON

RAFAEL PESTANA DA SILVA

São Luís – MA, Brasil.

2018

RAFAEL PESTANA DA SILVA

Redes Óticas Passivas: Tecnologias GPON e GEPON

Monografia submetida ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. M.Sc. Marcos Tadeu Rezende de Araújo

São Luís – MA, Brasil

2018

Da Silva, Rafael Pestana.

Redes Óticas Passivas: Tecnologias GPON e GEAPON/ Rafael Pestana da Silva–
São Luís, 2018.

69 f.

Impresso por computador (fotocópia).

Orientador: Marcos Tadeu Rezende de Araújo.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Maranhão, Curso de Engenharia
Elétrica, 2018.

1. GEAPON. 2. GPON. 3. ODN. 4. PON. I. Título.

Redes Ópticas Passivas: Tecnologias GPON e GEPON

RAFAEL PESTANA DA SILVA

Monografia aprovada em 13 de fevereiro de 2019



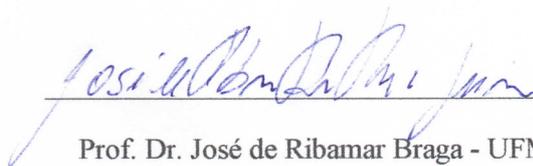
Prof. M.Sc. Marcos Tadeu Rezende de Araújo - UFMA

(Orientador)



Prof.^a Dra. Maria de Fátima Santos - UFMA

(Membro da banca examinadora)



Prof. Dr. José de Ribamar Braga - UFMA

(Membro da banca examinadora)

Dedico este trabalho a Deus por me conceder força e sapiência para a realização deste trabalho. Em segundo lugar aos meus pais Raimundo José Pestana da Silva e Iranilde Pestana da Silva, assim como meus irmãos, irmã (In Memoriam) e familiares que me deram o incentivo e apoio necessário para que eu pudesse superar as dificuldades.

Agradecimentos

A Deus, pelas bênçãos que tem derramado sobre minha vida e por iluminar meus caminhos nos momentos difíceis.

Aos meus pais, por terem sempre sido fonte de dedicação, incentivo e apoio durante todos esses anos de estudo. Meu sincero agradecimento e gratidão a eles.

Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constante.

Ao professor M. Sc. Marcos Tadeu Rezende de Araújo, pela oportunidade de expansão do meu conhecimento através do desenvolvimento desse trabalho e pelo suporte durante essa caminhada.

Ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão, e às pessoas com as quais pude conviver durante esses anos. Agradecendo a oportunidade a qual me foi dada para compartilhar conhecimentos e adquirir experiências na vida acadêmica.

“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada.”

(Albert Einstein)

Resumo

Neste trabalho foram apresentados estudos teóricos sobre as redes óticas passivas de distribuição de internet e dados, redes PON, bem como uma breve revisão sobre a fibra ótica e os componentes passivos da rede ótica de distribuição – ODN, as quais podem ser gerenciadas pelas tecnologias GPON e GEPON que foram o objeto de estudo principal deste trabalho. Abordou-se as características, protocolos de comunicação, taxas de transmissão, forma de encapsulamento de dados, eficiência, alocação dinâmica de banda, entre outros aspectos da GPON e GEPON. Realizou-se um estudo comparativo entre as tecnologias, analisando também aspectos como implantação das redes e viabilidade econômica partindo de um cenário ideal.

Palavras-chave: GEPON, GPON, ODN, PON.

Abstract

In this work, theoretical studies about internet and data distribution over passive optical network was performed, as well as a brief review about optical fiber and the passive components of an optical distribution network – ODN that can be managed by the GPON and GEAPON technologies which were the main object of study of this work. The characteristics, communication protocols, transmission rates, data encapsulation methods, efficiency, dynamic bandwidth allocation, among others GPON and GEAPON aspects were discussed in this study. It was performed a comparative study between these technologies, analyzing some aspects such as network implantation and economic feasibility from an ideal point of view.

Keywords: GEAPON, GEAPON, ODN, PON.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Representação gráfica de um cabo de fibra ótica – Fonte: [3]..... | 19 |
| Figura 2: Rede ótica passiva básica. Fonte: [6] | 20 |
| Figura 3: OLT 8820 G da Intelbras. Fonte: [7]. | 21 |
| Figura 4: ONU 110 da Intelbras. Fonte: [8]. | 21 |
| Figura 5: <i>Splitter</i> ótico de divisão 1:8. Fonte: [9]..... | 22 |
| Figura 6: Representação gráfica das arquiteturas FTTX. Fonte: [15]. | 23 |
| Figura 7: Configuração de referência GPON. Fonte: [19]. | 28 |
| Figura 8: Configuração da camada GTC. Fonte: Adaptado de: [30]..... | 31 |
| Figura 9: <i>Framing</i> da camada GTC. Fonte: Adaptado de [30]. | 31 |
| Figura 10: Estrutura do bloco PCBd. Fonte: [30]..... | 32 |
| Figura 11: Estrutura de disparo da GTC <i>upstream</i> . Fonte: [30]..... | 33 |
| Figura 12: Estrutura da GEM <i>framing</i> . Fonte: [30]..... | 34 |
| Figura 13: Arquitetura GEPON. Fonte: [23]. | 37 |
| Figura 14: Tráfego de dados <i>downstream</i> GEPON. Fonte: [25]. | 39 |
| Figura 15: Tráfego de dados <i>upstream</i> GEPON. Fonte: [25]..... | 40 |
| Figura 16: Autodescobrimento e registro de novas ONUs. Fonte: Adaptado de [26]..... | 41 |
| Figura 17: Cálculo de tempo de ida e volta dos dados. Fonte: [24]. | 42 |
| Figura 18: Alocação de banda para o tráfego de dados ONU-OLT. Fonte: Próprio autor..... | 43 |
| Figura 19: Alocação de banda através do algoritmo IPAC. Fonte: Próprio autor..... | 44 |
| Figura 20: Estrutura do <i>frame Ethernet</i> . Fonte: Adaptado de [27]..... | 45 |
| Figura 21: Máquina de fusão Fujikura 26S. Fonte: [38] | 51 |
| Figura 22: Rede de distribuição ótica para cálculo de orçamento de potência. Fonte: Próprio autor | 53 |
| Figura 23: <i>Powermeter</i> Overteck Ot-300A. Fonte: [39] | 54 |
| Figura 24: Variação da quantidade de ONUs por PON em relação ao aumento da largura de banda. Fonte: Próprio autor | 57 |
| Figura 25: Variação da quantidade de portas PON em relação ao aumento da largura de banda. Fonte: Próprio autor..... | 58 |
| Figura 26: Variação da quantidade de OLTs em relação ao aumento da largura de banda. Fonte: Próprio autor..... | 58 |

| | |
|---|----|
| Figura 27: Variação do custo em relação ao aumento da largura de banda. Fonte: Próprio autor | 59 |
| Figura A.1: Cabo ótico Drop compacto. Fonte: [42]..... | 63 |
| Figura A.2: Cabo Drop ótico compacto. Fonte: [43]..... | 64 |
| Figura A.3: Cabo ótico Drop figura 8. Fonte: [42]..... | 64 |
| Figura A.4: Caixa de Terminação ótica CTO. Fonte: [44]..... | 65 |
| Figura A.5: CTO instalada em poste de energia. Fonte: [45]..... | 65 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Taxas de transmissão de bit nominal referente à GPON..... | 29 |
| Tabela 2: Parametros da PMD de uma Rede Ótica de Distribuição - ODN..... | 29 |
| Tabela 3: Parâmetros de uma interface ótica de 2488,32 na direção <i>downstream</i> | 30 |
| Tabela 4: Parâmetros de uma interface ótica de 1244,16 na direção <i>upstream</i> | 30 |
| Tabela 5: Especificação dos parâmetros para os tipos de camada PMD..... | 38 |
| Tabela 6: Características de transmissão para 1000BASE-PX40..... | 38 |
| Tabela 7: Características de recepção para 1000BASE-PX40..... | 38 |
| Tabela 8: Atenuação por Km de fibras óticas..... | 50 |
| Tabela 9: Atenuação em <i>splitters</i> balanceados..... | 51 |
| Tabela 10: Atenuação em <i>splitters</i> desbalanceados..... | 51 |
| Tabela 11: Faixa de sensibilidade e valores calculados <i>downstream</i> e <i>upstream</i> | 53 |
| Tabela 12: Dimensionamento das redes GPON e GEPON (a)..... | 55 |
| Tabela 13: Dimensionamento das redes GPON e GEPON (b)..... | 54 |

Lista de siglas e abreviaturas

| | |
|----------|--|
| AES | <i>Advanced Encryption Standard</i> |
| AF | <i>Adaption Function</i> |
| Alloc-ID | <i>Allocation Identifier</i> |
| ANATEL | Agencia Nacional de Telecomunicações |
| ATM | <i>Asynchronous Transfer Mode</i> |
| BIP | <i>Bit Interleaved Parity</i> |
| BPON | <i>Broadband Passive Optical Network</i> |
| BT | <i>British Telecom</i> |
| BWmap | <i>Bandwidth map</i> |
| CATV | <i>Community Access Television</i> |
| CTO | Caixa de Terminação Ótica |
| DA | <i>Destination Address</i> |
| DBA | <i>Dynamical Bandwidth Assignment</i> |
| DBRu | <i>Dynamic Bandwidth Report upstream</i> |
| FCS | <i>Frame Check Sequence</i> |
| FEC | <i>Forward Coding Sublayer</i> |
| FSAN | <i>Full Service Access Network</i> |
| FTTB | <i>Fiber To The Building</i> |
| FTTC | <i>Fiber To The Curb</i> |
| FTTH | <i>Fiber To The Home</i> |
| FTTN | <i>Fiber To The Node</i> |
| FTTX | Fiber To The X |
| GEM | <i>GPON Encapsulation Method</i> |
| GEPON | <i>Gigabit Ethernet Passive Optical Networks</i> |
| GMII | <i>Gigabit Media Independent Interface</i> |
| GPON | <i>Gigabit-capable Passive Optical Networks</i> |
| GTC | <i>GPON Transmission Convergence</i> |

| | |
|---------|---|
| HEC | <i>Header Error Control</i> |
| IBGE | <i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> |
| IFG | <i>Inter-Frame Gap</i> |
| IPAC | <i>Interleaved Polling with Adaptive Cycle</i> |
| ITU-T | <i>International Telecommunication Standardization Sector</i> |
| LLID | <i>Logical Link Identification</i> |
| MAC | <i>Medium Access Control</i> |
| MPMC | <i>Multi-Point Control Protocol</i> |
| NE | <i>Network Ethernet</i> |
| NRZ | <i>Non Return To Zero</i> |
| NSR | <i>Non Status Reporting</i> |
| OAM | <i>Operations, Administration and Maintenance</i> |
| ODN | <i>Optical Distribution Network</i> |
| OLT | <i>Optical Line Termination</i> |
| ONT | <i>Optical Network Termination</i> |
| ONU | <i>Optical Network Unit</i> |
| OSI | <i>Open System Interconnection</i> |
| PCBd | <i>Physical Control Block downstream</i> |
| PCS | <i>Physical Coding Sublayer</i> |
| PLI | <i>Payload Length Indicator</i> |
| PLOAM | <i>Physical Layer Operations, Administrations and Maintenance</i> |
| PLOu | <i>Physical Layer Overhead upstream</i> |
| PMA | <i>Physical Medium Attachment</i> |
| PMD | <i>Physical Medium Dependent</i> |
| PON | <i>Passive Optical Networks</i> |
| Port-ID | <i>Port Identifier</i> |
| PTI | <i>Payload Type Indicator</i> |
| RTT | <i>Round Trip Time</i> |

| | |
|--------|---|
| SA | <i>Source Address</i> |
| SFD | <i>Start-of-Frame Delimiter</i> |
| SNI | <i>Service Node Interface</i> |
| SR | <i>Status Reporting</i> |
| T-CONT | <i>Transmission Container</i> |
| TDM | <i>Time Division Multiplexing</i> |
| TDMA | <i>Time Division Multiple Access</i> |
| UNI | <i>User Network Interface</i> |
| VoD | <i>Video on Demand</i> |
| VoiP | <i>Voice over Internet Protocol</i> |
| WDM | <i>Wavelength Division Multiplexing</i> |
| xDSL | <i>x Digital Subscriber Line</i> |

SUMÁRIO

| | Página |
|--|--------|
| 1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 Fibra Ótica..... | 18 |
| 1.1.1 Vantagens da fibra ótica | 19 |
| 1.2 Redes PON..... | 20 |
| 1.3 Distribuição FTTX..... | 22 |
| 1.4 Redes GPON..... | 23 |
| 1.5 Redes GEPON | 24 |
| 1.6 Justificativa | 24 |
| 1.7 Metodologia..... | 25 |
| 2 REDES GPON – <i>GIGABIT-CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORKS</i> | 27 |
| 2.1 Características da rede GPON | 27 |
| 2.2 Especificações da Camada PMD – <i>Physical Medium Dependent</i> | 28 |
| 2.2.1 Taxa de bit nominal do sinal digital..... | 29 |
| 2.2.2 Linha de código | 29 |
| 2.2.3 Especificações da PMD, OLT e ONU de acordo com a taxa de transmissão. | 29 |
| 2.3 Camada GTC - GPON..... | 30 |
| 2.3.1 Camada GTC <i>framing</i> | 31 |
| 2.3.1.1 Estrutura do <i>framing</i> GTC na direção <i>downstream</i> | 32 |
| 2.3.1.2 Estrutura do <i>framing</i> GTC na direção <i>upstream</i> | 33 |
| 2.3.1.3 Método de encapsulamento na GTC <i>payload</i> | 33 |
| 2.4 Alocação de banda na GPON | 34 |
| 3 REDES GEPON – <i>GIGABIT ETHERNET PASSIVE OPTICAL NETWORK</i> | 36 |
| 3.1 Características da GEPON..... | 36 |
| 3.2 Especificações da camada PMD - <i>Physical Medium Dependent</i> | 37 |
| 3.3 Distribuição no sentido <i>downstream</i> | 39 |
| 3.4 Distribuição no sentido <i>upstream</i> | 39 |
| 3.5 Controle Multiponto MAC | 40 |
| 3.5.1 Protocolo de controle multiponto – MPCP | 40 |
| 3.5.1.1 Descobrimto e registro de novas ONUs..... | 41 |
| 3.5.1.2 Controle da distância ente ONU e OLT..... | 42 |
| 3.5.2 Alocação de largura de banda dinâmica – DBA | 43 |
| 3.5.3 <i>Frame Ethernet</i> | 44 |
| 4 COMPARAÇÃO ENTRE GPON E GEPON E IMPLEMENTAÇÃO DAS REDES..... | 46 |
| 4.1 Comparativo entre GPON e GPON..... | 46 |

| | |
|--|----|
| 4.1.1 Encapsulamento | 46 |
| 4.1.2 Largura de banda | 46 |
| 4.1.3 Taxa de splitagem e alcance..... | 47 |
| 4.1.4 Segurança da rede..... | 47 |
| 4.1.5 Eficiência da GPON e GEPON | 47 |
| 4.1.6 Eficiência GPON – cabeçalho <i>downstream</i> | 48 |
| 4.1.7 Eficiência GPON – cabeçalho <i>upstream</i> | 48 |
| 4.1.8 Eficiência GEPON | 49 |
| 4.2 Implementação das tecnologias..... | 49 |
| 4.2.1 Perdas na fibra ótica | 50 |
| 4.2.2 Perdas em <i>splitters</i> , fusões e conectores. | 50 |
| 4.2.3 Orçamento de potência | 52 |
| 4.2.4 Comparativo Econômico | 54 |
| 5 CONCLUSÃO | 60 |
| Trabalhos Futuros | 61 |
| ANEXO | 62 |
| Anexo A | 63 |
| REFERÊNCIAS | 66 |

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o comportamento dos usuários do serviço de telecomunicações tem mudado bastante tendo em vista a evolução da tecnologia e o surgimento de variadas plataformas de comunicação, interação e entretenimento, tais como Voz sobre IP (VoIP), *Video on Demand* (VoD) e por *streaming*, jogos online, videoconferência, etc. Essas aplicações demandam uma grande quantidade de largura de banda, o que, por consequência, faz com que tanto os fabricantes de equipamentos que dão viabilidade a essas redes de comunicação quanto as prestadoras de serviço de telefonia e de dados aumentem o investimento na pesquisa e desenvolvimento dos dispositivos e das redes de transmissão de dados visando aumentar a capacidade das mesmas para atender as novas demandas do mercado [1].

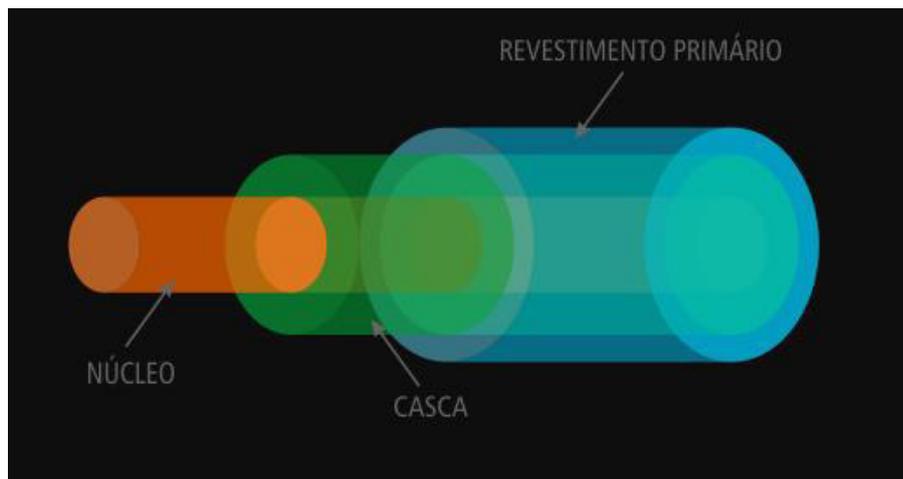
Com o avanço da tecnologia, os cabos metálicos, que nos dias atuais ainda continuam sendo utilizados nas redes de telefonia e de dados, vem sendo substituídos pelos cabos de fibra ótica que são superiores aos metálicos e também aos enlaces de rádio tanto pela sua capacidade, quanto pela confiabilidade e atenuação [2].

O surgimento da Fibra Ótica veio alavancar uma grande evolução no sistema de comunicação. Através disso, todas as novas tecnologias de comunicação, de um modo geral, têm adotado as fibras óticas como suporte básico de comunicação, de maneira a melhorar a transmissão de dados, de uma maneira mais rápida e mais segura. Essa transmissão se dá através da propagação da luz. A capacidade de transmissão depende essencialmente da estrutura da fibra. O material com que ela é feita determina as frequências ou comprimentos de onda e os níveis de atenuação impostas à fibra. Ao longo desse trabalho será possível se conhecer um pouco mais sobre essa tecnologia, de uma maneira prática e objetiva, além de entender porque as Fibras Óticas vêm pouco a pouco substituindo a utilização dos cabos nas telecomunicações.

1.1 Fibra Ótica

A fibra ótica é um tipo de cabo composto por material dielétrico, geralmente o vidro, que possui o formato de um filamento cilíndrico, cujo diâmetro se compara a um fio de cabelo. Esse filamento (núcleo da fibra ótica) é o meio por onde a luz é transmitida, o qual é envolto por uma casca que possui revestimento primário garantindo uma resistência mecânica à fibra [3], conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Representação gráfica de um cabo de fibra ótica.



Fonte: ZTTCable; [3]

Núcleo – Meio pelo qual a luz é transmitida.

Casca – Envolve o núcleo e possui índice de refração diferente.

Revestimento primário – Proporciona resistência mecânica à fibra ótica.

1.1.1 Vantagens da fibra ótica

As vantagens da utilização da fibra ótica são as seguintes: imunidade a interferências, grande capacidade de transmissão, ausência de ruídos, isolamento elétrica, pequeno tamanho e peso, sigilo de comunicação.

Imunidade a interferências – livre de interferências eletromagnéticas pelo fato de ser composto por material dielétrico e não é afetada por alterações climáticas.

Grande capacidade de transmissão – tem a capacidade de transportar dados com uma velocidade extremamente alta, últimos testes de laboratório chegaram à marca de 10 petabits/s [4].

Ausência de ruídos – O fato de as fibras não irradiarem luz externamente faz com que as mesmas possam ser agrupadas sem que haja interferência entre elas, ou seja, ruídos nas transmissões de dados; fato este que ocorre com os cabos metálicos quando perdem parte de seu isolamento.

Isolação elétrica – como a fibra ótica é composta por material dielétrico, estes fornecem uma isolação elétrica entre os transceptores. Não há risco de faíscas quando há o rompimento da fibra e também não há risco de choque, o que permite a manutenção da mesma com os aparelhos da rede ligados.

Pequeno tamanho e peso – Possui tamanho e peso extremamente reduzido quando comparado à cabos metálicos e semelhantes, obtendo vantagem tanto em seu transporte quanto em sua instalação.

Sigilo de comunicação – o fato das fibras óticas não irradiarem a luz que está sendo propagada resulta em um alto nível de segurança dos dados que estão sendo transmitidos, uma vez que para se extrair dados da fibra seria necessário o desvio de parte da potência da luz nela injetada, uma tentativa de extração de informação seria rapidamente identificada.

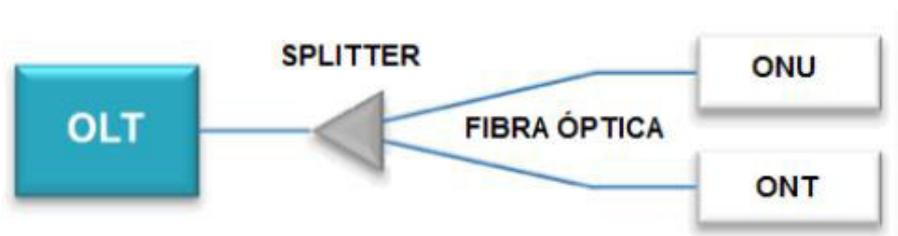
1.2 Redes PON

Após o surgimento da fibra ótica e após estudos realizados para o aprimoramento e desenvolvimento da mesma, a quantidade de banda de transmissão através da fibra aumentou de forma considerável, levando então, em 1986, ao trabalho pioneiro no desenvolvimento do conceito das Redes Óticas Passivas (PON - *Passive Optical Networks*), no laboratório da BT (*British Telecom*) na Inglaterra, por Keith Oakley e Chris Todd [5].

Uma rede PON é composta geralmente por Terminal de Linha Ótica - OLT (*Optical Line Termination*), Unidade de Rede Ótica - ONU (*Optical Network Unit*), Terminal de Rede Ótica - ONT (*Optical Network Termination*), fibra ótica e *splitters*, porém pode conter também conectores acopladores óticos, etc. Essas redes são gerenciadas, geralmente, pelas tecnologias GPON e GEAPON. A figura 2 ilustra uma rede ótica passiva e seus componentes.

As redes óticas passivas não possuem componentes ativos ao longo de sua extensão, sendo composta apenas por elementos óticos passivos localizados na planta externa entre a OLT e ONU, esses componentes passivos não precisam ser alimentados eletricamente para entrar em funcionamento; portanto, o nome passiva é oriundo justamente desta característica. Os únicos elementos ativos, que necessitam ser energizados para entrarem em funcionamento, são as OLTs e as ONUs situados nas extremidades das redes [12].

Figura 2 - Rede ótica passiva básica.



Fonte: Pinheiro, José; [6]

OLT – do inglês *Optical Line Terminal*, que significa Terminal de Linha Ótica é o componente da rede que se situa próximo ao núcleo da rede na central da operadora. É responsável pelo gerenciamento da rede PON, faz a conversão de sinais elétrico-óticos e ótico-elétricos, controla o fluxo de informações nos sentidos *upstream* e *downstream* da rede com as ONUs e ONTs [13].

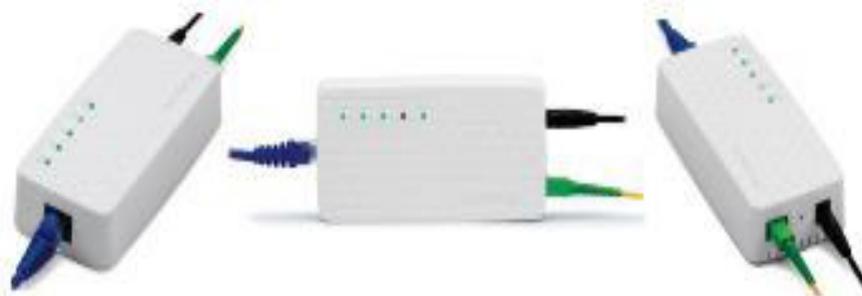
Figura 3 - OLT 8820 G da Intelbras.



Fonte: Intelbras; [7]

ONU/ONT – do inglês *Optical Network Unit* e *Optical Network Terminal*, que significam Unidade de Rede Ótica e Terminal de Rede Ótica respectivamente, sendo que a ONU seria para múltiplos usuários finais da rede e a ONT para um único usuário final da rede. Ambos são responsáveis por fazer a conexão do usuário com a rede PON e seus protocolos e é gerenciado pela OLT [13]. Neste trabalho ambos ONU e ONT serão denominados por ONU.

Figura 4 - ONU 110 da Intelbras.

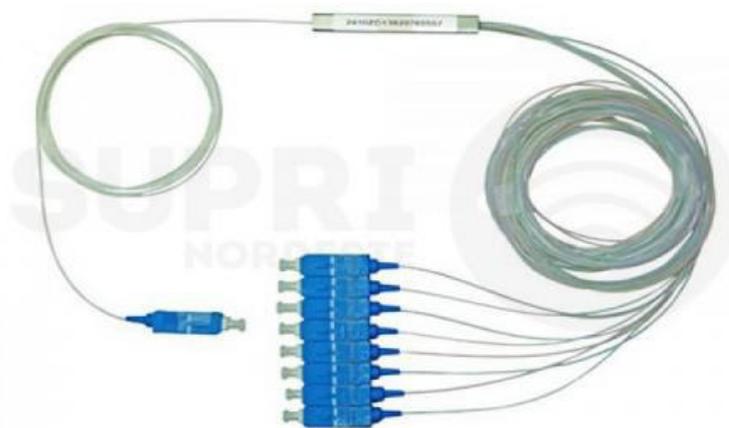


Fonte: Intelbras; [8]

Splitters – são divisores óticos passivos que fazem a divisão dos sinais óticos e o distribui para múltiplas fibras, pode ser balanceado quando faz a divisão do sinal de forma

simétrica para as fibras na saída, ou desbalanceado, onde faz a divisão o sinal ótico de forma assimétrica para as fibras de saída [14].

Figura 5 - *Splitter* ótico de divisão 1:8.



Fonte: SupriNordeste; [9]

1.3 Distribuição FTTX

FTTX é um termo genérico em inglês *Fiber To The X* que significa “Fibra Até o X” é uma arquitetura de rede que substitui parte ou por completo o cabeamento metálico ou coaxial de uma rede por fibra ótica que são utilizados em telecomunicações. Esses tipos de arquiteturas que utilizam a fibra ótica conseguem entregar altíssimas transmissão de banda para seus usuários, como já mencionado no subtítulo 1.1. As formas de FTTX mais conhecidas são: FTTN, FTTC, FTTB e FTTH [11].

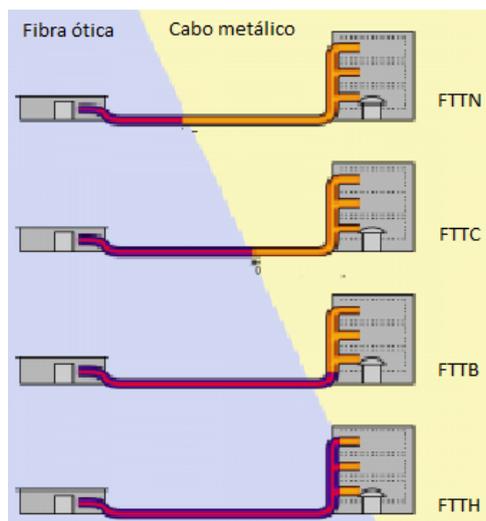
FTTN (*Fiber To The Node*) que significa Fibra Até o Nó, é a topologia em que a fibra ótica vai desde a central de serviços até conectar-se a um armário de rua, onde o restante da conexão até o usuário final é feito através de cabo metálico [15].

FTTC (*Fiber To The Curb*) que significa Fibra Até a Calçada, é a topologia na qual a fibra ótica se estende até um armário de poste, onde o restante da conexão até o usuário final é feita através de cabo metálico ou coaxial, semelhante ao FTTN porém o armário se localiza mais perto dos usuários [11].

FTTB (*Fiber To The Building*) que significa Fibra Até o Prédio, é a topologia na qual a fibra ótica se estende desde a central de serviços até o prédio e a partir deste ponto a distribuição no interior do prédio é feita, geralmente, através de uma rede *Ethernet* [15].

FTTH (*Fiber To The Home*) que significa Fibra Até a Casa, é a topologia na qual a fibra ótica se estende desde a central de serviços e segue até o usuário final, ou seja, toda a extensão da rede desde a OLT até o usuário final é composta por fibra ótica [15] [11].

Figura 6 - Representação gráfica das arquiteturas FTTH.



Fonte: Redes&Cia, 2014; [15]

1.4 Redes GPON

A rede GPON (*Gigabit-capable Passive Optical Networks*) que significa Rede Ótica Passiva *Gigabit*, é uma rede PON que possui o terminal de linha ótico (OLT) que geralmente situa-se na central de serviços da operadora ou provedora de internet. A rede de fibra ótica e os terminais de rede ótica (ONT) ou unidades de rede ótica (ONU) ficam situadas nos estabelecimentos dos usuários finais ou em armários de rua, respectivamente. A rede de fibra ótica principal pode ter seu sinal ótico dividido entre outras fibras através de componentes passivos conhecidos como *splitters*.

Na rede GPON, as informações são transmitidas de forma bidirecional através de uma fibra ótica, utilizando-se de dois comprimentos de onda. No sentido *downstream*, que vai da OLT até a ONU tem-se um comprimento de onda em torno de 1490nm e no sentido *upstream*, que vai da ONU até a OLT, tem-se um comprimento de onda em torno de 1310nm.

A OLT faz a transmissão de todo o tráfego de dados na rede de fibra ótica no sentido *downstream* utilizando o protocolo de Multiplexação por Divisão de Tempo - TDM (*Time Division Multiplexing*), ou seja, todas as ONUs/ONTs recebem os dados lançados pela OLT, porém elas identificam apenas as informações que são de fato para cada uma delas. No sentido

upstream, a ONU recebe autorização da OLT para fazer disparos de transmissão utilizando o protocolo de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo – TDMA (*Time Division Multiple Access*).

As redes GPON são definidas pelas recomendações da ITU-T G.984.x, as quais vão desde G.984.1 a G.984.7. Esta tecnologia será abordada com mais detalhes neste trabalho em capítulo posterior.

1.5 Redes GEPON

O Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica - IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) também desenvolveu padrões baseados nas redes óticas passivas que trabalha com o padrão *Ethernet*, ou seja, também possuem OLT, ONU, ONT e componentes passivos da rede. A rede GEPON (*Gigabit Ethernet Passive Network*) ou Rede Ótica Passiva *Ethernet Gigabit* transmite dados encapsulados em *frames Ethernet* seguindo o padrão IEEE 802.3. A rede GEPON utiliza a Multiplexação por divisão de comprimento de onda – WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e possui uma capacidade de transmissão de dados de 1.25 Gbits/s tanto na direção *downstream* quanto na direção *upstream*.

A rede GEPON é compatível com outros padrões *Ethernet*, portanto, quando se trabalha em uma rede em que seus dispositivos em ambas as pontas são baseados no padrão *Ethernet*, nenhuma conversão ou encapsulamento dos dados é necessário.

1.6 Justificativa

No Brasil, o uso da internet vem se expandindo ano após ano, segundo pesquisa realizada no ano de 2016 pelo IBGE, 64,7% da população acima de 10 anos estão conectadas à internet [16]. Estes dados mostram que mesmo com o aumento da demanda por internet, muitas pessoas ainda não têm acesso a este serviço, o que demonstra um mercado muito grande a ser capitalizado pelas empresas de telecomunicações, sendo elas de grande ou de pequeno porte.

Os investimentos com a finalidade de expandir e difundir ainda mais a internet é um fator real e presente no Brasil e a necessidade de implementação de mais recursos destinados a este setor é de suma importância, principalmente no Estado do Maranhão onde o índice percentual de domicílios com acesso à internet está entre os piores de todos os estados da Federação [16], onde é mais evidenciado nas regiões rurais e interioranas do Estado.

Segundo levantamento feito pela ANATEL e publicado em agosto de 2018, em um período de 12 meses, dentre 08/2017 e 08/2018 houve um crescimento de contratos ativos de banda larga fixa no Brasil de mais de 2,43 milhões de acessos, o que representa um crescimento

de 8,63% do total de usuários ativos registrados os quais foram de 30,54 milhões. Segundo as estatísticas, as tecnologias mais empregadas na distribuição de banda larga fixa no Brasil são a xDSL ainda possui a maior quantidade de contratos ativos com 41,35% do mercado, seguida pelo modem a cabo com uma quantidade de contratos ativos referentes a 30,51% do mercado e logo em seguida tem-se a fibra ótica com 15,27% do total de contratos ativos no Brasil [17].

Ainda seguindo esse levantamento, foi observado que o aumento percentual de contratos ativos dentro desse 12 meses em relação às tecnologias acima citadas foram de +81,89% para a fibra ótica com a adesão de novos 2,10 milhões de assinantes, +6,40% para a modem a cabo com a adesão de 561 mil novos assinantes e em contrapartida tem-se a xDSL com -4,94% tendo portanto uma evasão de assinantes [17].

Tais dados comprovam o crescimento bastante substancial de usuários de redes de fibra ótica e a necessidade da abordagem sobre um tema de muita relevância no mercado de distribuição de serviço de internet e de dados utilizando-se de tecnologias de redes óticas passivas.

A forma com a qual a internet é distribuída é de fundamental importância, pois gera um impacto direto na qualidade e custo do serviço. Este estudo tem como finalidade analisar o funcionamento e detalhar o uso das tecnologias GPON e GEPON na distribuição da internet por ser tecnologias com uma eficiência considerável e um custo razoável, mostrando sua topologia, características e aplicações.

1.7 Metodologia

A estruturação deste estudo consiste da seguinte forma.

Capítulo 1; Introdução, onde é abordado informações importantes sobre fibra óticas, redes PON, sendo contextualizados para a abordagem das tecnologias óticas.

Capítulo 2; Redes GPON, onde os conceitos básicos dessa tecnologia e dos componentes que fazem parte de sua estrutura são abordados, bem como o processo de distribuição de dados ao longo da rede.

Capítulo 3; Redes GEPON, onde os conceitos básicos dessa tecnologia e dos componentes que fazem parte de sua estrutura são abordados, bem como o processo de distribuição de dados ao longo da rede.

Capítulo 4; GEPON x GPON, onde serão abordados, com efeito comparativo, as características de ambas as tecnologias, visando um esclarecimento referente à implementação das mesmas.

Capítulo 5; Conclusão, onde será apresentado as conclusões gerais obtidas através deste trabalho.

2 REDES GPON – GIGABIT-CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORKS

Por volta dos anos 2000 a tecnologia de Rede Ótica Passiva de Banda Larga – BPON (*Broadband Passive Optical Network*), que seria a antecessora da tecnologia GPON e também padronizada pela ITU-I, que já estava sendo implementada na época, passou a sofrer certas dificuldades de operação em relação à demanda de serviços devido ao surgimento no mercado dos vídeos digitais, justamente pelo fato de que a BPON utilizava uma taxa de dados de no máximo 622Mbps/s, que geralmente era distribuída entre 32 usuários e daria uma taxa de aproximadamente 20Mbps/s por usuário, banda essa que seria consumida apenas por apenas um *streaming* de vídeo digital em full HD. Tendo em vista essa necessidade de aumento de largura de banda, o grupo FSAN (*Full Service Access Network*), que também foi responsável pela pesquisa e desenvolvimento das especificações da BPON, começou o estudo da padronização de uma nova tecnologia que sucederia a BPON, o que culminou na padronização da GPON publicada inicialmente em 2003 pelas séries ITU-T G984.

A FSAN é um grupo informal de operadoras de telecomunicação fundado em 1995, que fazem frequentes reuniões visando o desenvolvimento de suas tecnologias, os estudos oriundo dessas reuniões são repassados para a Seção de normas da União Internacional de Telecomunicações- ITU-T (*International Telecommunication Standardization Sector*), os quais servem de guia para as padronizações e recomendações das séries ITU-T G.983 (BPON) e ITU-T G.984 (GPON) [18].

2.1 Características da rede GPON

A GPON identifica duas combinações de velocidade de transmissão mais utilizadas, que são:

- 1,2 Gbit/s de *upstream* e 2,4 Gbit/s de *downstream*;
- 2,4 Gbit/s de *upstream* e 2,4 Gbit/s de *downstream*;

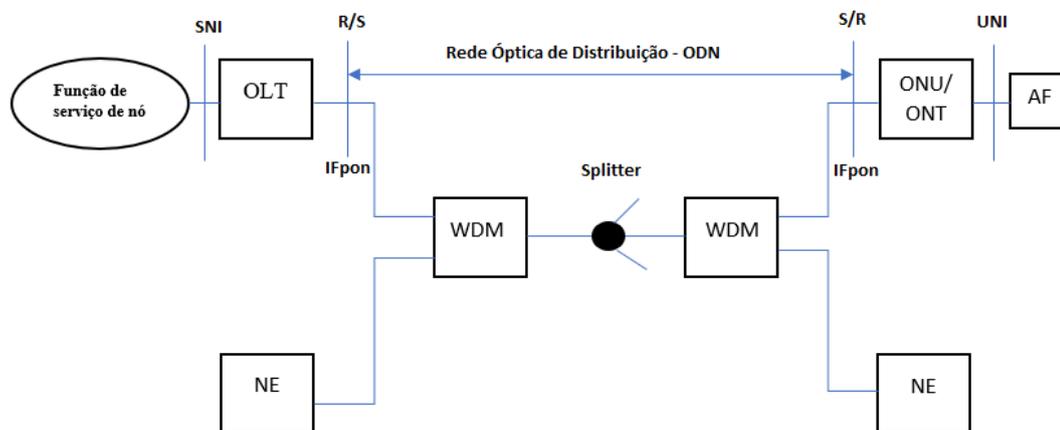
Sendo que a primeira é a mais utilizada pelas operadoras devido as características de demanda do usuário ser mais no sentido *downstream* do que no sentido *upstream*.

O alcance lógico máximo da ONU para a OLT, desconsiderando a limitação da camada física, foi definido como 60km.

O alcance físico, ou seja, a distância física máxima da ONU para a OLT foi definida em duas opções, 10km e 20km.

A tecnologia GPON possui um *split ratio* de até 1:128, ou seja, pode ser demultiplexado para até 128 usuários, utilizando-se apenas uma porta GPON.

Figura 7 - Configuração de referência GPON.



Fonte: ITU-T G.984.1, 2008; [19]

Na Figura 7 tem-se a configuração de referência para a tecnologia GPON, onde mostra da esquerda para a direita a SNI, que representa a interface e serviços suportados pela OLT. A OLT já citada anteriormente (ver subcapítulo 1.3). O NE (*Network Element*) que é módulo da rede que usa diferentes comprimentos de onda a partir da OLT e a partir da ONU. O “R” que é o ponto da rede um pouco antes da fibra se conectar a ONU no sentido *downstream* e um ponto de conexão e da OLT no sentido *upstream*. O “S” que é o ponto da rede logo após a OLT no sentido *downstream* e da ONU no sentido *upstream*. *IFpon* é uma interface específica que suporta todos os elementos de protocolos necessários para permitir a comunicação e transmissão entre a OLT e ONU, está situado no nó de referências dos pontos R/S e S/R. OS módulos de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda – WDM que se não forem usados não são necessários. O *splitter* que é um componente passivo responsável por dividir o sinal ótico da fibra. A ONU já citadas anteriormente (ver subcapítulo 1.3). A UNI representa a interface e serviços suportados pela ONU e a Função de Adaptação – AF (*Adaptation Function*) que é um módulo adicional que contém interfaces e serviços não suportados pela ONU e pode também estar presente na OLT [19].

2.2 Especificações da Camada PMD – *Physical Medium Dependent*

A camada PMD, suas funções e características são descritas pela recomendação ITU T G.984.2, a qual fornece informações sobre serviços de suporte de rede com os requisitos de

largura de banda para os variados serviços suportados pela GPON e a capacidade de transportar estes variados serviços entre a UNI e SNI através do meio físico que é a fibra ótica [20].

2.2.1 Taxa de bit nominal do sinal digital

Segundo a recomendação supracitada a taxa de transmissão da linha deve ser múltipla de 8KHz e estão padronizadas nas seguintes taxas de linhas nominais *downstream* e *upstream*, conforme mostra a tabela a seguir.

Tabela 1 – Taxas de transmissão de bit nominal referente à GPON.

| Direção de transmissão | Taxa de bit nominal |
|------------------------|---------------------|
| <i>Downstream</i> | 1244,16 Mbit/s |
| | 2.488,32 Mbit/s |
| <i>Upstream</i> | 155,52 Mbit/s |
| | 622,02 Mbit/s |
| | 1244,16 Mbit/s |
| | 2488,32 Mbit/s |

Fonte: Adaptado de ITU-T G.984.2, 2003; [20]

2.2.2 Linha de código

A codificação no sentido *downstream* e *upstream* é a NRZ (*Non Return To Zero*), cuja convenção usada para o nível ótico lógico é:

Para o 1 binário, alto nível de emissão de luz;

Para o 0 binário, baixo nível de emissão de luz [20].

2.2.3 Especificações da PMD, OLT e ONU de acordo com a taxa de transmissão.

Tabela 2 – Parâmetros da PMD de uma Rede Ótica de Distribuição – ODN.

| Item | Unidade | Especificação |
|---|---------|-----------------------------------|
| Faixa de atenuação | dB | Classe A: 5-20 Classe B: 10-25 |
| | dB | Classe C: 15-30 |
| Máximo alcance lógico | Km | 60 |
| Máximo alcance lógico diferencial | Km | 20 ou 40* |
| Mínimo de divisões suportada – <i>split ratio</i> | - | 1:16, 1:32, 1:64 e 1:128** |
| Transmissão bidirecional | - | 1 Fibra WDM ou 2 Fibras |

*A recomendação ITU-T G.984.7 publicada em 2010 adiciona a possibilidade de se estender o alcance lógico diferencial em até 40 km aumentando o atraso de propagação do sinal recebido pela OLT das ONUs/ONTs que é de 202 μ s (20km) para 402 μ s.

**A recomendação ITU-T G.984.1 publicada em 2008 e alguns fabricantes informam que a rede GPON pode suportar o *split raio* de até 1:128, mas o mais utilizado é 1:64.

Fonte: Adaptado de ITU-T G.984.2, 2003; [20]

Tabela 3 – Parâmetros de uma interface ótica de 2488,32 na direção *downstream*.

| Item | Unidade | Especificação | | |
|---------------------------------------|---------|---------------|-----|-----|
| Transmissor OLT | | | | |
| Taxa de bit nominal | Mbit/s | 2488,32 | | |
| Faixa de operação da largura de banda | nm | 1480-1500 | | |
| Classe da ODN | - | A | B | C |
| Potência média injetada Mínima | dBm | 0 | +5 | +3 |
| Potência média injetada Máxima | dBm | +4 | +9 | +7 |
| Receptor ONU | | | | |
| Classe da ODN | - | A | B | C |
| Sensibilidade mínima | dBm | -21 | -21 | -28 |
| Sensibilidade máxima | dBm | -1 | -1 | -8 |

Fonte: Adaptado de ITU-T G.984.2, 2003; [20]

Tabela 4 – Parâmetros de uma interface ótica de 1244,16 na direção *upstream*.

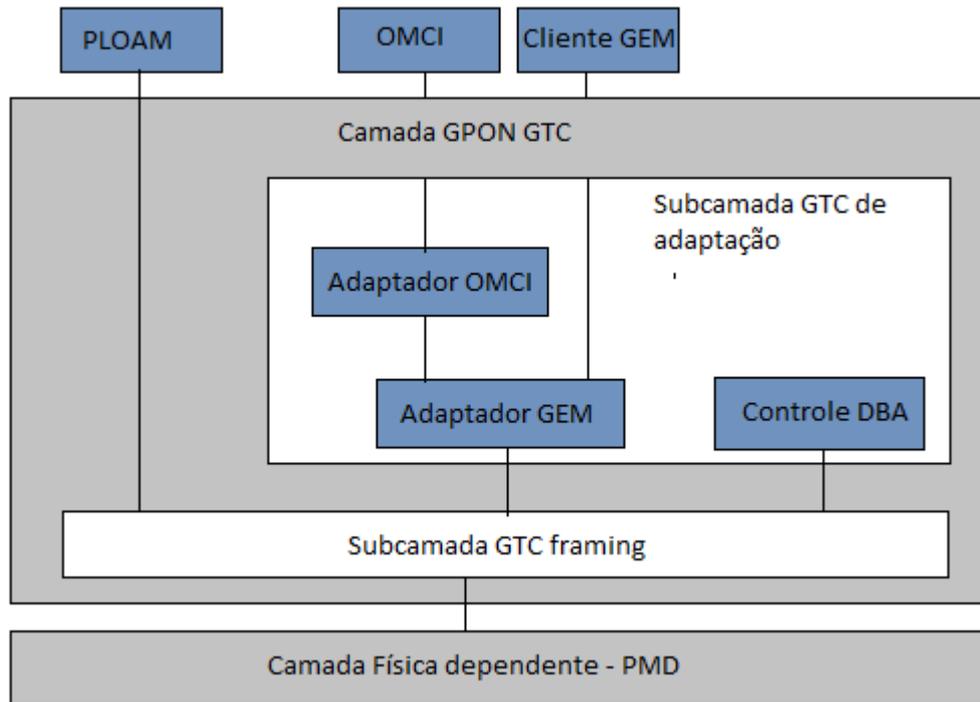
| Item | Unidade | Especificação | | |
|---------------------------------------|---------|---------------|----|-----|
| Transmissor ONU | | | | |
| Taxa de bit nominal | Mbit/s | 1244,16 | | |
| Faixa de operação da largura de banda | nm | 1260-1360 | | |
| Classe da ODN | - | A | B | C |
| Potência média injetada Mínima | dBm | -3 | -2 | +2 |
| Potência média injetada Máxima | dBm | +2 | +3 | +7 |
| Receptor OLT | | | | |
| Classe da ODN | - | A | B | C |
| Sensibilidade mínima | dBm | -24 | -8 | -29 |
| Sensibilidade máxima | dBm | -3 | -7 | -8 |

Fonte: Adaptado de ITU-T G.984.2, 2003; [20]

2.3 Camada GTC - GPON

A camada GTC fornece o transporte de multiplexação entre a OLT e a ONU, também acomoda funções de adaptação para a camada, protocolos de encapsulamento, Operação e Manutenção de camada Física – PLOAM (*Physical Layer Operations, Administrations and Maintenance*), Alocação Dinâmica de Largura de Banda – DBA (*Dynamic Bandwidth Assignment*), etc. A figura a seguir ilustra a configuração da camada GTC [30].

Figura 8 - Configuração da camada GTC.

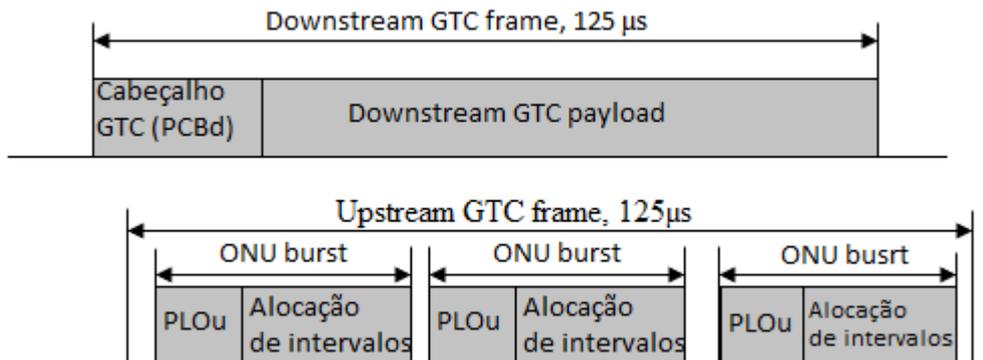


Fonte Adaptado de ITU-T G.984.3, 2014; [30]

2.3.1 Camada GTC framing

Na direção *downstream* a GPON utiliza a multiplexação por divisão de tempo TDM, onde a OLT transmite todo o tráfego de dados dentro da fibra ótica, cada ONU seleciona seu respectivo pacote de informações e descarta o restante dos dados que não lhe serve. Antes de trafegar pelo meio físico esses dados são encapsulados tanto no sentido *downstream* como no sentido *upstream* e esse encapsulamento ocorre nos *framings* da camada GTC.

Figura 9 - Framing da camada GTC.



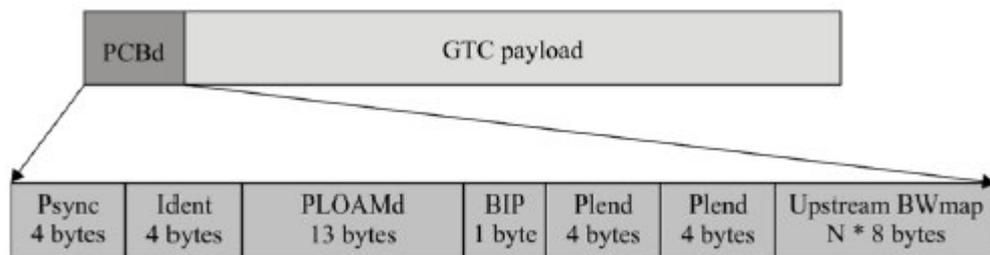
Fonte: Adaptado de ITU-T G.984.3, 2014; [30]

2.3.1.1 Estrutura do *framing* GTC na direção *downstream*

O *frame* GTC consiste no Bloco de Controle Físico – PCBd (*Physical Control Block downstream*) e da seção *payload* da GTC. Este *frame* tem uma duração de 125µs e um tamanho de 3880 *bytes* a qual corresponde com a taxa de transmissão de 2488,32 Gbit/s. A faixa de comprimento do PCBd depende do número de estruturas alocadas por *frame*.

A OLT envia o PCBd de maneira *broadcast* e cada ONU recebe todas as informações do PCBd e, posteriormente, retém apenas as informações relevantes para cada ONU. O PCBd é dividido em vários campos como mostrado na figura a seguir.

Figura 10 - Estrutura do bloco PCBd.



Fonte: ITU-T G.984.3, 2014; [30]

Psync: composto por um padrão de 4 *bytes* e inicia cada PCBd, a ONU utiliza esse padrão para localizar o começo do *frame*.

Ident: composto por 4 *bytes* e é utilizado para indicar largas estruturas de *frames*. Esse campo contém um contador de *superframe*.

PLOAMd: composto por 13 *bytes* é um campo que acomoda mensagens tanto *upstream* quanto *downstream*, essas mensagens são de determinadas funções tais como ativação de ONU.

BIP: composto por 1 *byte* serve para detectar erros no link, comparando todos os *bytes* recebidos desde o último BIP e comparando com o BIP transmitido.

Plend: é composto por 4 *bytes* e é enviado duas vezes para o aumento da robustez contra erros. Os primeiros 12 *bits* são responsáveis por mostrar a largura do BWmap (Blen), e isso limita o número de alocações que podem ser concedidas para 4095 durante a duração da janela de 125 µs, a largura atual do BWmap é de 8*Blen *bytes*. Os 12 bits seguintes seriam destinados à partição ATM a qual não é mais utilizada pela tecnologia GPON, sendo, portanto, preenchido com zeros; e o último *byte* é preenchido por funções para detectar e corrigir erros.

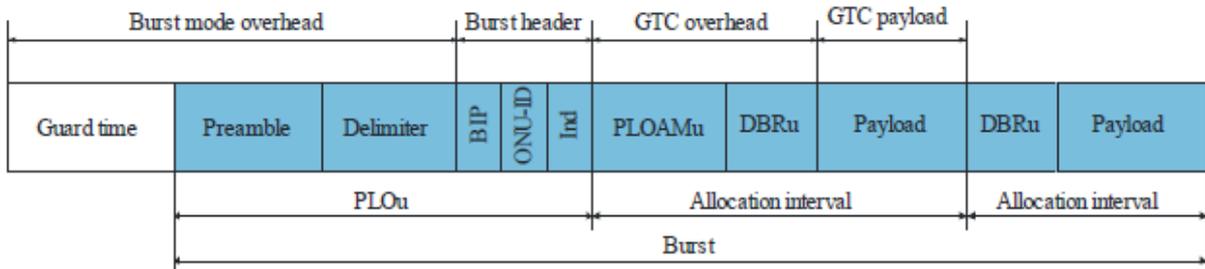
BWmap: é composta por uma série de arranjos de 8 *bytes* que são estruturas de alocação, onde cada uma delas concede permissão para a transmissão em modo *burst* no sentido *upstream* [18] [30].

2.3.1.2 Estrutura do *framing* GTC na direção *upstream*

O *frame* GTC *upstream* consiste em múltiplos disparos de transmissão (*transmission bursts*) oriundos de 1 ou mais ONUs. Cada disparo consiste em uma Camada Física de *Overhead* – PLOu (*Physical Layer Overhead upstream*) e um ou mais intervalos de alocação de banda associados com um *Alloc-ID* específico que serve como um número de identificação da ONU na rede de distribuição. Cada *frame* possui uma duração de 125µs com tamanho de 19440 *bytes* para uma taxa de transmissão de 1244,16 Gbit/s e tamanho de 38880 *bytes* para uma taxa de transmissão de 2488,32 Gbit/s.

Na estrutura de disparo (*burst*) *upstream* da Figura 11, tem-se o campo *burst overhead* e o *burst header* concatenados com a alocação dos intervalos para formar um *frame* de disparo completo. O *burst overhead* serve para permitir que o receptor da OLT seja capaz de configurar o limite e a fase de amostragem corretamente e estabelecer uma delimitação de *bytes*. A PLOu é um conjunto de campos de configuração transmitidos pela ONU antes dos intervalos de alocações individuais os quais contém a carga útil (GTC *payload*) transmitida pelo usuário [18].

Figura 11 - Estrutura de disparo da GTC *upstream*.

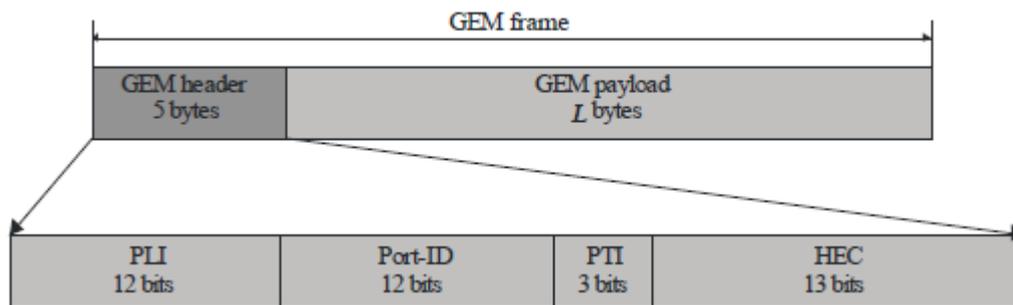


Fonte: ITU-T G.984.3, 2014; [30]

2.3.1.3 Método de encapsulamento na GTC *payload*

O método de encapsulamento na GTC *payload* é igual para ambos os sentidos *upstream* e *downstream* de transmissão de dados, fornece a delimitação dos *frames* referentes aos arquivos dos usuários e fornece também a identificação do *frame* em questão para multiplexação.

Figura 12 - Estrutura da GEM *framing*.



Fonte: ITU-T G.984.3, 2014; [30]

De acordo com a Figura 12 tem-se, o PLI que indica o comprimento L em *bytes* da GEM *payload*, este campo possui tamanho de 12 bit e permite fragmentos de até 4095 *bytes*. A Port-ID que é a identificação da porta e é usada para fornecer 4096 identificadores únicos de tráfego, permitindo assim a multiplexação do tráfego. A PTI que é usada para indicar que tipo de conteúdo está sendo transportado na GEM *payload*, podendo assim receber o devido tratamento. O HEC (*Header Error Control*) que é uma função que detecta e corrige erros para o cabeçalho.

2.4 Alocação de banda na GPON

A OLT é responsável por fazer a alocação de banda para as ONUs, o canal *upstream* é compartilhado por várias ONUs esses dados transmitidos por elas podem possivelmente colidir caso sejam transportados em tempos aleatórios. Tendo em vista que as ONUs estão localizadas em locais diferentes e possuem cada uma um atraso específico, a OLT faz o cálculo do atraso e configura um registro para cada ONU através de mensagens via PLOAM equalizando o atraso referente a cada ONU distribuída na rede. Após os atrasos serem mapeados, a OLT concede a janela de transmissão para cada ONU em um intervalo específico de tempo.

A alocação de banda dinâmica – DBA (*Dynamic bandwidth allocation*) é feita através de algoritmos que permitem a adaptação rápida de alocação de banda baseada no tráfego de dados, ou seja, controla ao volume de largura de banda que é alocado para as ONUs, o DBA é controlado pela OLT. Estes algoritmos são utilizados no sentido *upstream*, pois no sentido *downstream* os dados são transmitidos em modo broadcast.

Dentro das recomendações ITU-T serão ressaltados 2 algoritmos, o Sem Relatório de Status – NSR (*Non Status Reporting*) e o Relatório de Status – SR (*Status Reporting*), porém a própria ITU-T deixa aberta a implementação de diferentes algoritmos DBA.

NSR: a OLT aloca constantemente uma pequena quantidade extra de largura de banda para cada ONU, se a ONU não possui dados para serem enviados, a mesma transmite *frames* ociosos. A partir do momento que a OLT identifica que a ONU não está mandando *frames* ociosos ela vai aumentando a largura de banda para a ONU, quando ela verifica que estão sendo enviados *frames* ociosos ela reduz a alocação de banda para aquela determinada ONU.

SR: tem-se o T-CONT (refere-se a um grupo de conexões lógicas, porém é tratado como uma única unidade com o propósito de atribuição de largura de banda) que carrega o relatório de status sobre a quantidade de dados que a ONU possui para ser transmitido. A OLT faz o monitoramento e solicita o status do T-CONT para cada ONU. A OLT recebe esse relatório e atualiza o campo BWmap com essas informações. O campo BWmap atualizado é enviado para as ONUs com a informação do tempo em que terá que transmitir seus dados juntamente com o tamanho da largura de banda concedida. Quando a ONU não tem dados para ser transmitido, a mesma envia uma célula ociosa para a OLT durante o tempo de concessão concedido indicando não ter dados para a transmissão, fazendo com que a OLT realoque a concessão desse T-CONT específico para o T-CONT de outra ONU [31].

3 REDES GEAPON – GIGABIT ETHERNET PASSIVE OPTICAL NETWORK

No ano de 2004, o IEEE aprovou e publicou o padrão IEEE 802.3ah que define tecnologias e protocolos para a *Ethernet* na Primeira Milha – EFM (*Ethernet in the First Mile*) que define parâmetros de controle, camadas físicas e gerenciamento para a rede de acessos do usuário utilizando o padrão *Ethernet* [22].

O padrão IEEE 802.3 define várias taxas de transmissão de acordo com a tecnologia empregada em sua camada física. Neste trabalho a taxa de transmissão estudada se limitará à de 1,25 Gbit/s, onde se emprega o uso das redes 1G-EPON ou GEAPON, que se refere à tecnologia 1000BASE, mais precisamente 1000BASE-PX10 a 1000BASE-PX40, as quais possuem características mais aproximadas para fins de estudo neste trabalho.

3.1 Características da GEAPON

A taxa de transmissão, na faixa delimitada por este estudo, possui uma taxa de 1,25 Gbit/s no sentido *downstream* e 1,25 Gbit/s no sentido *upstream*, ou seja, possui uma característica de largura de banda simétrica. Suporta alcances de até 20km. utiliza a rede ótica passiva, possuindo assim a OLT, ONU e também divisores óticos os quais são característicos de uma rede PON.

De acordo com a Figura 13, observa-se que a tecnologia GEAPON é definida em duas camadas do sistema OSI, camada de enlace e camada física as quais são divididas em subcamadas e pertencem tanto à OLT quanto à ONU. Essas subcamadas são descritas brevemente a seguir:

OAM (*Operations, Administration, and Maintenance*) – consiste em um grupo de funções que dão suporte à rede e são responsáveis por monitorar e manter os segmentos de operação, detecção de falhas, reparos, etc.

Controle MAC Multiponto (MPMC) – protocolo que faz mensagens, diagramas de estado e contadores para realizar o controle do acesso à topologia ponto multiponto.

Controle de Acesso ao Meio MAC – consiste no encapsulamento de dados e o acesso ao meio.

GMII – Responsável por fazer a interação entre a camada MAC de capacidade de 1,25Gbit/s e a camada física com capacidade de 1,25 Gbit/s.

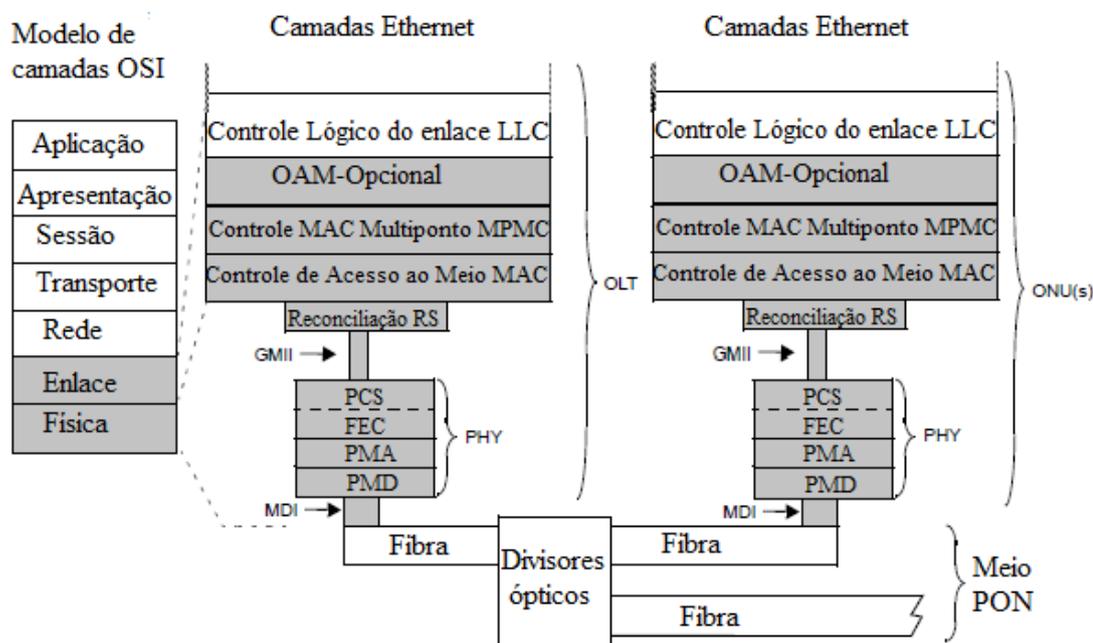
PCS (*Physical Coding Sublayer*) – Subcamada física responsável por codificar e decodificar os arquivos.

FEC (*Forward Error Correction*) – Controla e corrige erros antes da transmissão dos dados.

PMA (*Physical Medium Attachment*) – possui funções responsáveis pelo mapeamento da transmissão e recepção de bits entre a PMA e PMD.

PMD (*Physical Medium Dependent*) – é o responsável da interface com o meio de transmissão [23].

Figura 13 - Arquitetura GEAPON.



Fonte: IEEE802.3 Section 3, 2015; [23]

3.2 Especificações da camada PMD - *Physical Medium Dependent*

Na rede GEAPON uma única OLT, através da camada PMD, transmite os dados no sentido *downstream* em modo *broadcast* para uma ou várias ONU, ou seja, todas elas recebem todo o tráfego oriundo da OLT, em seguida, as ONU selecionam apenas as informações que são pertinentes a cada uma delas descartando o restante das informações. Cada ONU transmite seus dados no sentido *upstream* para a OLT em forma de disparos em tempos distintos uma das outras. A troca de informação acontece de forma simultânea em ambos os sentidos *downstream* e *upstream*.

A camada PMD fornece uma conexão ponto multiponto através da rede ótica passiva, para a taxa de transmissão de 1,25Gbit/s com um alcance típico de 10 a 20km. Esta camada possui especificações para diversas tecnologias de transmissão tais como 1000BASE-PX10, 1000BASE-PX20, 1000BASE-PX30 e 1000BASE-PX40, sendo a última mais enfatizada neste

estudo. Utilizando-se da 1000BASE-PX40 pode-se obter um *split ratio*, divisão do sinal ótico, para até 64 usuários ou 1:64. Como descreve a tabela a seguir, juntamente com outras características de transmissão e recepção de dados pertinentes às 1000BASE-PX40 [24].

Tabela 5 – Especificação dos parâmetros para os tipos de camada PMD.

| Descrição | PX10 | | PX20 | | PX30 | | PX40 | | Unid |
|-----------------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|------|
| <i>Split ratio</i> | 1:16 | | 1:16 | | 1:32 | | 1:64 | | - |
| Alcance | De 0,5m a 10km | | De 0,5m a 20km | | | | | | |
| Direção | <i>up</i> | <i>down</i> | <i>up</i> | <i>down</i> | <i>up</i> | <i>down</i> | <i>up</i> | <i>down</i> | - |
| Comprimento de onda | 1310 | 1490 | 1310 | 1490 | 1310 | 1490 | 1310 | 1490 | nm |
| MAX perda inserida no canal | 20 | 19,5 | 24 | 23,5 | 29 | | 33 | | dB |
| MIN perda inserida no canal | 5 | | 10 | | 15 | | 18 | | dB |

Fonte: Adaptado de IEEE802.3 *Section 5*, 2015; [24]

Tabela 6 – Características de transmissão para 1000BASE-PX40.

| Descrição | PX40 - <i>downstream</i> | PX40 - <i>upstream</i> | Unidade |
|--------------------------------|--------------------------|------------------------|---------|
| Taxa de bit | 1,25 | 1,25 | Gbit/s |
| Comprimento de onda | 1480 a 1500 | 1290 a 1330 | nm |
| Potência Média injetada Máxima | +10 | +6 | dBm |
| Potência Média injetada Mínima | +4 | +2 | dBm |

Fonte: Adaptado de IEEE802.3 *Section 5*, 2015; [24]

Tabela 7 - Características de recepção para 1000BASE-PX40.

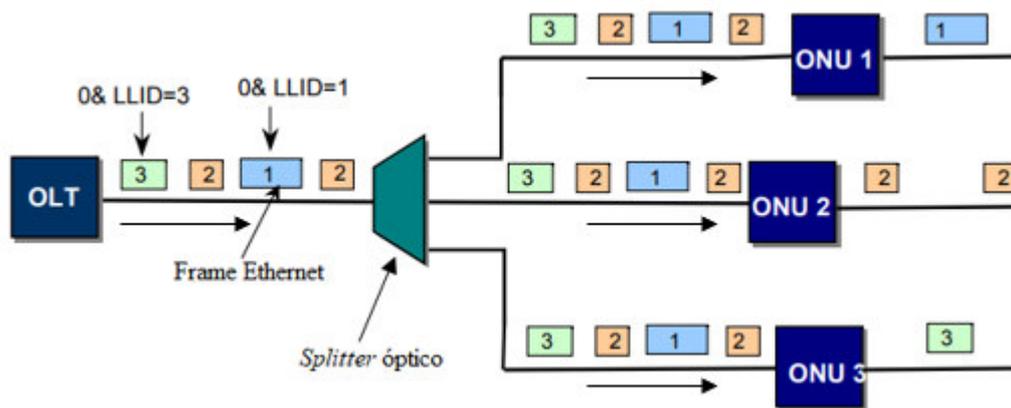
| Descrição | PX40 - <i>downstream</i> | PX40 - <i>upstream</i> | Unidade |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------|---------|
| Taxa de bit | 1,25 | 1,25 | Gbit/s |
| Comprimento de onda | 1260 a 1360 | 1480 a 1500 | nm |
| Potência média recebida | -12 | -8 | dBm |
| Sensibilidade máxima de recepção | -32 | -30 | dBm |

Fonte: Adaptado de IEEE802.3 *Section 5*, 2015; [24]

3.3 Distribuição no sentido *downstream*

A transmissão de dados no sentido *downstream* é feita pela OLT de forma *broadcast*, no cenário PON essa informação passa pelos *splitters* que dividem esse sinal óptico para todas as ONU as quais estão conectadas à rede de distribuição. Esses dados são transmitidos através de *frames Ethernet*, a ONU identifica seus respectivos *frames* pelo Link Lógico de Identificação – LLID (*Logical Link Identification*) descartando aqueles que não lhe pertencem, conforme ilustra a Figura 14.

Figura 14 - Tráfego de dados *downstream* GEPON.

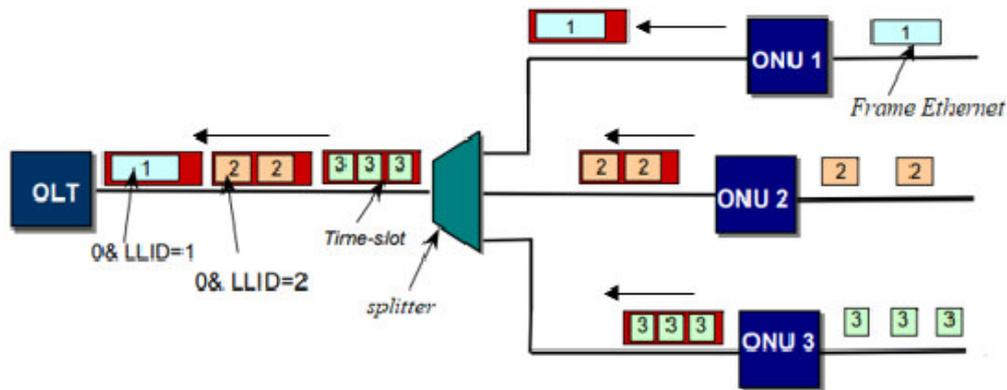


Fonte: Pires, João. 2009; [25]

3.4 Distribuição no sentido *upstream*

No sentido *upstream* os *frames Ethernet* são enviados pela ONU para a OLT. Através do meio físico, esses *frames* são acomodados em um *time slot* e enviados em modo de disparo (*burst*) por cada ONU. Para evitar a colisão quando se envia os pacotes *Ethernet* para a OLT, utiliza-se o Protocolo de Controle Multiponto – MPCP (*Multipoint Control Protocol*) o qual baseia-se no método de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo - TDMA [24].

Figura 15 - Tráfego de dados *upstream* GEPON.



Fonte: Pires, João. 2009; [25]

3.5 Controle Multiponto MAC

Para evitar colisão entre os *frames* enviados pela ONU e aumentar a eficiência no tráfego de dados no sentido *upstream* uma janela de transmissão (*grant*) é alocada para cada ONU. Os *frames* vão sendo enfileirados até que essa janela de transmissão seja concedida pela OLT, aí então, são enviados em modo *busrt* dentro de um *time slot* (ver Figura 15).

O Controle Multiponto MAC define operações na camada de acesso ao meio para o controle das redes Ponto-Multiponto, possui funcionalidade estendida desenvolvida para gerenciar controle em tempo real de envios de pacotes *Ethernet*.

Nesta camada tem-se o Protocolo de Controle Multiponto – MPCP (*Multipoint Control Protocol*), o qual possui a finalidade de gerenciar o acesso ao meio. Cada ONU possui um LLID que serve para diferenciar as ONUs uma das outras, o LLID é comportado dentro do *frame Ethernet* no campo preâmbulo [27].

3.5.1 Protocolo de controle multiponto – MPCP

Na topologia ponto-multiponto cada ONU contém um protocolo MPCP que se comunica com o protocolo MPCP da OLT, o protocolo de controle multiponto utiliza mensagens, estados de máquinas e contadores para fazer o gerenciamento do canal de acesso das ONUs contém várias funções tais quais as de autodescobrimento, registro das ONUs, controle de distância entre os dispositivos e alocação de banda. Essas funções são realizadas através de mensagens GATE, REPORT e REGISTER.

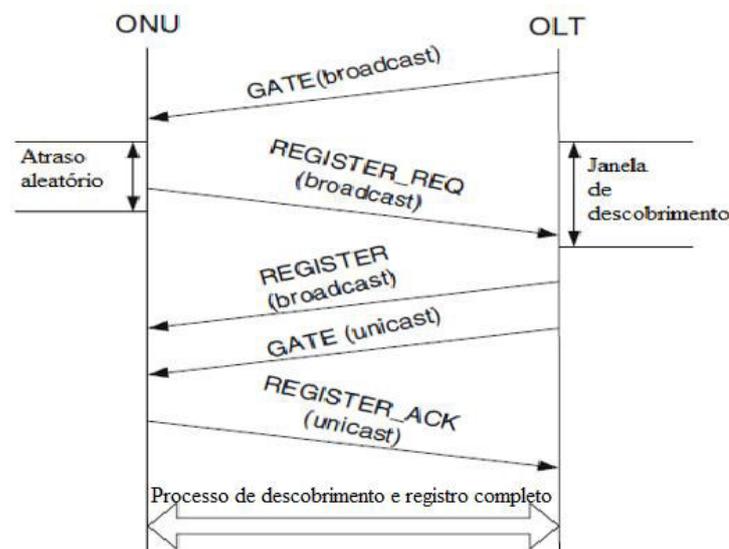
3.5.1.1 Descobrimto e registro de novas ONUs

O processo de autodescobrimento e registro de uma nova ONU conectada à rede é feita através de funções que definem LLID, que aloca largura de banda e faz a compensação das diferenças de atraso de tempo entre as ONUs e a OLT.

Os processos para autodescobrimento e registro são detalhados a seguir:

A OLT emite periodicamente mensagens *Discovery GATE* para todas as ONUs da rede e essa mensagem contém um *broadcast LLID* e um endereço de destino *multicast*. As ONUs conectadas recentemente esperam uma janela de descobrimento (*discovery window*) ser disponibilizada para transmitir uma requisição de registro na rede chamada de REGISTER_REQ. Logo após a OLT receber a requisição de registro das ONUs, a mesma emite uma mensagem de registro, REGISTER, juntamente com um link de identificação LLID para a respectiva ONU. Após enviar a mensagem de registro, a OLT envia também uma mensagem *unicast GATE* juntamente com uma *unicast LLID* assim com um endereço de destino – DA (*Destination Address*) *unicast* para a ONU, essas mensagens *unicast* são enviadas para todas as ONUs que estão conectadas à rede, porém apenas é aproveitada pela ONU que está sendo registrada, as demais ONUs ignoram essas mensagens que são filtradas pelas mesmas na camada RS e posteriormente descartadas. Depois desse processo, a ONU em questão espera uma janela *grant* para enviar à OLT uma mensagem REGISTER_ACK, finalizando assim o processo de autodescobrimento e registro de novas ONUs. Esses processos são ilustrados na figura abaixo [26].

Figura 16 - Autodescobrimento e registro de novas ONUs.

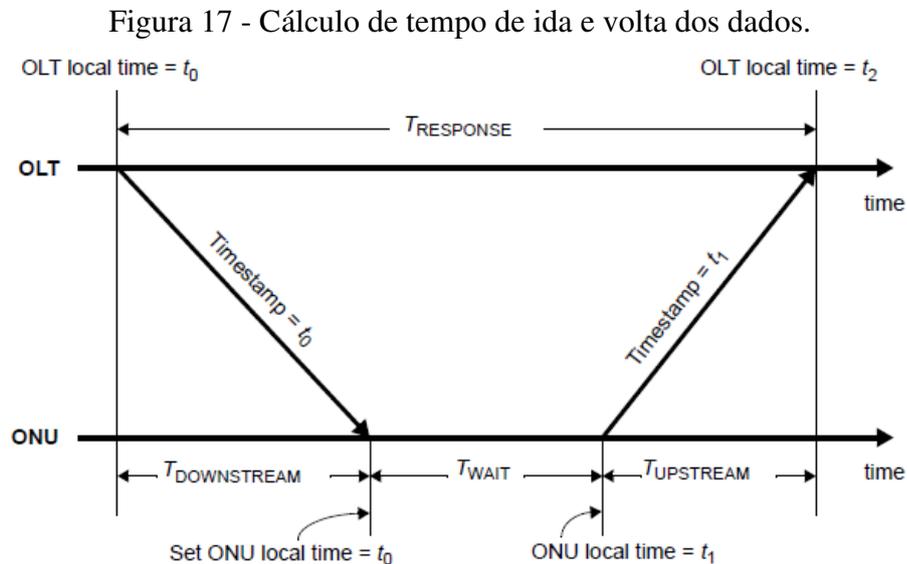


Fonte: Adaptado de Ansari, N; Zhang, J. 2013; [26]

3.5.1.2 Controle da distância ente ONU e OLT

Em uma rede de distribuição de internet e de dados cada ONU está localizada em um local diferente cuja distância física para a OLT difere uma para as outras, portanto o tempo de ida e volta - RTT (*Round Trip Time*) das mensagens da ONU para a OLT e vice-versa também serão diferentes podendo sofrer certas variações, isso faz com que seja muito provável a colisão entre mensagens entre as ONUs.

Tendo por finalidade evitar a colisão entre esses dados, o RTT é medido e posteriormente considerado como “logicamente igual”, ou seja, fazendo com que a distância lógica seja igual entre todas as ONUs e OLT. Feito isto, Cada ONU e OLT possui um contador de 32-bit que são incrementados a cada 16ns, contadores estes que formam um campo marcador de tempo (*time stamp*) que é definido pelo MPCP. Quando ambos os dispositivos transmitem uma informação, o primeiro *byte* desse arquivo serve como referência para a marcação de tempo do campo *time stamp* desse dispositivo, a partir do momento que a ONU recebe o arquivo ele configura seu próprio campo *time stamp* de acordo com o valor do *time stamp* contido no arquivo recebido, quando a OLT recebe o arquivo, ele utiliza o valor contido no *time stamp* desse arquivo para fazer o cálculo do tempo de ida e volta (RTT) da informação [24]. A Figura abaixo ilustra esse processo.



Fonte: IEEE802.3 Section 5, 2015; [24]

$T_{downstream}$ = atraso da propagação *downstream*

$T_{upstream}$ = atraso da propagação *upstream*

T_{wait} = tempo de espera na ONU = $t_1 - t_1$

$T_{response} = \text{Tempo de resposta na OLT} = t_2 - t_1$

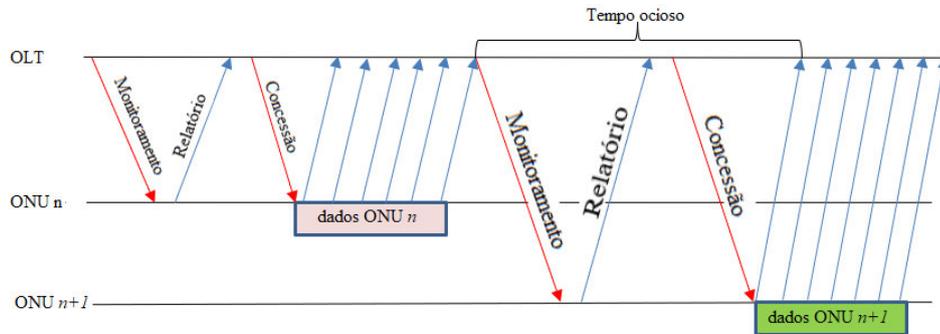
$$RTT = T_{downstream} + T_{upstream} = T_{response} - T_{wait} = (t_2 - t_0) - (t_1 - t_0) =$$

$$RTT = t_2 - t_1 \quad (1)$$

3.5.2 Alocação de largura de banda dinâmica – DBA

Uma alta utilização de banda larga necessita de um controle de largura de banda em tempo real para a o tráfego de dados dos usuários. Para ajustar a alocação de banda para um controle de tráfego *upstream* em tempo real, o estado da fila de *frames Ethernet* das ONUs precisam ser monitorados antes que a alocação de banda para a ONU em questão seja determinada, portanto, a OLT monitora o estado da fila de *frames* na ONU n , quando recebe a resposta dessa ONU n ela aloca a largura de banda necessária para os *frames* contido nesta ONU, repetindo o processo com a próxima ONU $n+1$ assim que detecta a transmissão do último bit da ONU anterior. Entretanto, esse processo tem um tempo ocioso muito grande entre a transmissão de dados das ONUs, como ilustra a figura abaixo [26].

Figura 18 - Alocação de banda para o tráfego de dados ONU-OLT.



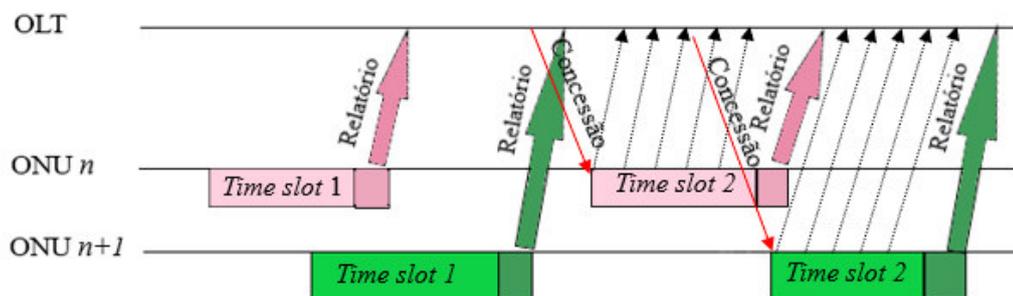
Fonte: Próprio autor

Para diminuir o tempo ocioso existente entre as transmissões *upstream* dos dados das ONUs, um novo algoritmo DBA foi proposto, o Monitoramento Intercalado com Ciclo de Tempo Adaptativo – IPAC (*Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time*). O IPAC torna a utilização do canal mais eficiente reduzindo o atraso de propagação e a sobrecarga, maximiza o ganho na multiplexação dinâmica pelo fato de se adaptar a alocação de banda no sentido *upstream* de acordo com a demanda de tráfego das ONUs, diferentemente dos sistemas de TDM estáticos.

Neste algoritmo, o monitoramento e a concessão da janela de transmissão da ONU $n+1$ ocorre enquanto a ONU n está transmitindo os *frames Ethernet* no sentido *upstream*, nesse

momento a OLT envia a informação de concessão juntamente com o tempo de início da transmissão e o tamanho da banda alocada para a ONU $n+1$. Ao final do *time slot* da transmissão de cada ONU inclui-se um relatório de *status* da mesma para atualizar o monitoramento da OLT sobre os dados que já estão enfileirados nesta ONU para que possa ser usado no ciclo seguinte (ver Figura 19). O fato de a OLT conhecer o valor do RTT de cada ONU permite com que a OLT possa programar as janelas de transmissão de modo a evitar a sobreposição desses arquivos enviados pelas ONUs [26] [28].

Figura 19 - Alocação de banda através do algoritmo IPAC.



Fonte: Próprio autor

3.5.3 Frame Ethernet

Os dados são transmitidos pela rede no sentido *downstream* e *upstream* através de *frames Ethernet* que são constituídos dos campos preambulo, delimitador de início de *frame* - SFD, endereço de destino - DA, endereço da fonte - SA, tipo/tamanho, carga útil - *payload* e checagem do *frame* - FCS. Esses campos do *frame Ethernet* servem para que seja possível tanto o transporte dos dados pelo meio físico como para que os dispositivos que fazem parte da rede (OLT, ONU, etc) sejam capazes de receber, enviar, identificar e fazer a leitura dos dados transportados. Os campos são detalhados a seguir.

Preambulo: possui um tamanho de 7 *bytes*, indica aos dispositivos de recepção que o *frame* está chegando, é composto por um padrão alternados dos números binários 1 e 0, fazendo com que seja facilmente reconhecido e sincronizado pelos dispositivos, é também onde se localiza o Link Lógico de Identificação - LLID, é seguido pelo campo SFD.

Delimitador de Início de *Frame* - SFD (*Start frame Delimiter*): possui o tamanho de 1 *byte* e serve para indicar de fato o início do *frame*, é seguido pelo campo DA.

Endereço de Destino - DA (*Destination Address*): possui o tamanho de 6 *bytes* e identifica para qual dispositivo o *frame* é destinado, podendo ser para um dispositivo em particular ou para um grupo de dispositivos, é seguido do campo SA.

Endereço da Fonte – SA (*Source Address*): possui o tamanho de 6 *bytes* e identifica qual dispositivo enviou o *frame*, esse endereço é sempre de um dispositivo individual, é seguido do campo tipo/tamanho.

Tipo/Tamanho: possui o tamanho de 2 *bytes* e indica o tamanho do campo carga útil-*payload* contido no *frame* assim como o tipo de arquivo que este *frame* está transportando fazendo com que o dispositivo que receber este pacote já tenha uma ideia de qual arquivo irá eventualmente ler, é seguido do campo carga útil – *payload*.

Carga útil – *payload*: possui um tamanho que varia entre 46 a 1500 *bytes*, porém pode ser estendida em até 1982 *bytes* onde esses 482 *bytes* adicionais seriam utilizados para protocolos de encapsulamentos adicionais, a *payload* é o campo que contém de fato os dados de interesse do usuário que são enviados ou recebidos pelo mesmo, é seguido pelo campo FCS.

Checação do *frame* – FCS (*Frame Check Sequence*): possui o tamanho de 4 *bytes* e é definido como um número em bits baseado no conteúdo do pacote *frame* que vai desde o campo DA até o campo *payload*. Serve para detectar arquivos corrompidos dentro do *frame* em que se encontra, quando o dispositivo que recebe o *frame* ele também estabelece um número FCS que tem que ser igual ao contido no pacote que está sendo lido para que se possa validar as informações contidas no *frame*, caso contrário ele é dado como inválido e descartado [27] [29].

Figura 20 - Estrutura do *frame Ethernet*.

| | | | | | | |
|-----------|--------|---------|---------|----------|------------------|---------|
| Preambulo | SFD | DA | SA | Tipo/Tam | Payload | FCS |
| 7 bytes | 1 byte | 6 bytes | 6 bytes | 2 BYTES | 46-1500 bytes | 4 bytes |

Fonte: Adaptado de IEEE802.3 *Section 1*, 2015; [27]

4 COMPARAÇÃO ENTRE GPON E GEPON E IMPLEMENTAÇÃO DAS REDES

4.1 Comparativo entre GPON e GEPON

Como foi observado, tanto a tecnologia GPON quanto a GEPON trabalham com o gerenciamento de redes óticas passivas – PON, as quais possuem como base para a sua rede de distribuição a OLT, ONU e *splitters*. A tecnologia GPON é padronizada pelo grupo ITU-T através das recomendações ITU-T 984.x (x =1,2,3,4,5,6 e 7) as quais fazem a descrição do funcionamento e procedimentos que são utilizados em uma rede com dispositivos que utilizam a GPON. A tecnologia GEPON é padronizada pelo grupo IEEE através das normas contidas na IEEE 802.3 cuja seções vão de 1 a 6 abrangendo várias especificações e taxas de transmissão de largura de banda.

4.1.1 Encapsulamento

A tecnologia GEPON utiliza pacotes *Ethernet*, que também são padronizados pelo IEEE, para a transmissão da dados e comunicação entre seus dispositivos, portanto, a transmissão desses dados acontece de forma direta sem precisar de mais encapsulamentos na camada 2 para o transporte desses dados.

Para a tecnologia GPON, que é padronizada pelo ITU-T, é necessário o encapsulamento desses pacotes *Ethernet* e de outros tipos de pacotes através de múltiplos protocolos na camada 2, para que os dados possam ser enviados e identificados pelos dispositivos da rede.

4.1.2 Largura de banda

A tecnologia GEPON trabalha com uma capacidade de largura de banda de 1,25 Gbit/s tanto no sentido *downstream* quanto no sentido *upstream*, ou seja, possui uma taxa de transmissão simétrica, enquanto que a tecnologia GPON consegue trabalhar com várias taxas de transmissão de dados chegando a uma capacidade de 2,5 Gbit/s *downstream* e *upstream*. porém a taxa mais utilizada nesta tecnologia é a assimétrica, 2,5 Gbit/s no sentido descendente e 1,25 Gbit/s no sentido ascendente, isto ocorre devido ao comportamento da rede em relação ao perfil de uso de dados dos usuários, onde a quantidade de tráfego de dados é maior no sentido *downstream* do que no *upstream*.

4.1.3 Taxa de splitagem e alcance

Para a tecnologia GEAPON o IEEE recomenda algumas taxas de divisões óticas as quais variam de acordo com o tipo de 1000BASE-PX que são empregados, neste estudo verificou-se taxas de divisão que variam entre 1:16, 1:32 e 1:64. O alcance fornecido pelo IEEE também varia de 10 a 20 Km.

Para a tecnologia GPON a ITU-T recomenda em suas especificações taxas de divisões óticas que podem chegar a 1:128 por porta PON da OLT, sendo que a mais comum é a de 1:64, ou seja, uma porta PON pode atender até 64 usuários. O alcance físico desta tecnologia é também de 20Km podendo ser estendido até 40 Km utilizando-se da recomendação ITU-T G984.7 que apresenta uma rede de longo alcance para esta tecnologia.

4.1.4 Segurança da rede

A tecnologia GEAPON não possui um método de encriptação definido pelo padrão IEEE 802.3, no entanto a maioria dos equipamentos desta tecnologia possuem encriptação AES (*Advanced Encryption Standard*) que é introduzida pelas próprias fabricantes, e essa encriptação ocorre tanto no sentido *downstream* quanto no sentido *upstream* [18].

A tecnologia GPON possui o mecanismo de encriptação AES já definido nas recomendações ITU-T, porém essa encriptação ocorre apenas no sentido *downstream* [30].

Ambas as Tecnologias possuem o sistema de OAM (*Operation Administrator and Maintenance*) o qual ajuda no controle da operação, administração e manutenção destas tecnologias dentro da rede de distribuição.

4.1.5 Eficiência da GPON e GEAPON

A eficiência das tecnologias depende de vários parâmetros tais como o tamanho do pacote de distribuição, configurações do cabeçalho, eficiência do algoritmo de alocação de banda dentre outros, o que faz com que o cálculo destes valores seja de fato complexos.

Quando se trata de eficiência geralmente refere-se a carga útil ou ao termo *throughput*, ambos os termos se referem à medida da quantidade de dados dos usuários que a rede pode transmitir durante um período de tempo. Então essa seria a relação entre o valor máximo de *throughput* e a taxa de transmissão da rede. Deste modo, a maneira mais fácil de calcular essa eficiência seria identificando os cabeçalhos com o encapsulamento dos dados.

4.1.6 Eficiência GPON – cabeçalho *downstream*

Segundo Hajduczenia et al (2006), pressupondo uma rede GPON com 16 ONUs integradas a ela, o total de cabeçalho no sentido *downstream* pode ser estimado através da adição de todos os componentes do campo PCBd resultando em $30 + 26 \times 8 = 158 \text{ bytes}$.

Devido ao fato do encapsulamento GEM permitir a fragmentação dos pacotes, o campo *payload* do *frame downstream* não possuirá slot restante, dito isto e considerando um tráfego intenso na rede, há ao menos um pacote de dados com transmissão pendente dentro do buffer da OLT ao mesmo tempo em que há o recebimento de um slot e destinado para a determinada ONU, tem-se portanto uma única transmissão de cabeçalho adicional que está relacionada ao campo GEM *framing* da Figura 12, que possui um tamanho de 5 bytes por *frame* da GEM *payload*.

O número de *frames* por carga útil - *payload* pode ser estimado quando o tamanho médio de uma distribuição de pacotes é conhecido. Por exemplo, para o serviço CATV tem-se uma média de 511 bytes no sentido *upstream* e 655 bytes no sentido *downstream* [36]. Portanto, o cabeçalho de transmissão *downstream* para os valores mencionados acima foram estimados em 1,76% e 1,55% respectivamente [37].

4.1.7 Eficiência GPON – cabeçalho *upstream*

Ainda segundo Hajduczenia et al (2006), tomando como referência o mesmo cenário adotado anteriormente, tem-se 16 ONUs e o total de cabeçalho constante no sentido *upstream* pode também ser estimado e resultando em $96 + 24 + 16 = 136 \text{ bits}$, o que por sua vez equivale a 17 bytes . 96 bits referem-se ao PLO, 24 bits aos campos BIP, ONU-ID e IND e, 16 bits ao DBRu para uma única T-CONT na ONU (ver 2.3.1.2.). Outros campos opcionais foram omitidos pelo fato de serem usados com uma frequência pequena. Levando em consideração que se tem 19440 bytes disponíveis durante um slot de concessão de transmissão e que as 16 ONUs tem que ser atendidas, logo, resulta em um total de 1215 bytes disponíveis para cada ONU. Como tem-se 17 bytes de cabeçalho constante e 5 bytes do cabeçalho GTC por *frame* da GEM *payload* tem-se um total de 21 bytes alocados para o cabeçalho resultando em 1198 bytes restantes. Para o serviço CATV citado anteriormente, verificou-se que de acordo com o tamanho da distribuição de pacotes tem-se em média uma fragmentação de 3 pacotes para atender a carga útil, produzindo assim 15 bytes de cabeçalho GTC resultando em um cabeçalho total de 32 bytes por cada transmissão *upstream*, tomando esses dados como base, estima-se uma média de cabeçalho no sentido *upstream* de 2,63%. Essa porcentagem pode aumentar

quando se leva em consideração outros fatores como o nivelamento de potência que requer um campo extra, o que acarretaria em um aumento do cabeçalho [37].

4.1.8 Eficiência GEAPON

O cabeçalho *Ethernet* é o resultado da soma do tamanho dos campos que compõem o *frame*, ou seja, o preambulo com 8 *bytes*, o DA com 6 *bytes*, o SA com 6 *bytes*, o Tipo/Tamanho com 2 *bytes* e o FCS com 4 *bytes*. Além desses campos, adiciona-se também um intervalo mínimo entre os *frames* de 12 *bytes*, o chamado IFG (*Inter-Frame Gap*). Portanto, o total de *bytes* constantes obtidos é de 38 *bytes*.

O valor médio do cabeçalho de encapsulamento depende da distribuição do tamanho dos pacotes. Tomou-se como base as distribuições do tamanho dos pacotes da referência [36].

O valor médio do cabeçalho total pode ser obtido utilizando a seguinte equação:

$$\text{Overhead médio} = (\sum E(s) \times F(s) - \sum s \times F(s)) / (\sum E(s) \times F(s)) \quad (2)$$

Onde s é o tamanho da carga útil – *payload*, $F(s)$ é a função de probabilidade de distribuição e $E(s)$ é o tamanho do encapsulamento feito na carga útil s [46].

Utilizando os valores da referência [36] para a distribuição do tamanho do pacote, obtém-se o valor médio do cabeçalho *Ethernet* para cada *frame* de 7,42%.

É importante ressaltar que ainda existem os 20% adicionais de cabeçalho referente ao uso da codificação de linha 8B/10B utilizado no *Ethernet*.

4.2 Implementação das tecnologias

Ambas as tecnologias GPON e GEAPON fazem o gerenciamento de redes PON, que são compostas pelas OLTs, ONUs, *splitters* e a fibra ótica. As OLTs e ONUs vão variar de acordo com as tecnologias que as mesmas suportam, nesse caso a GPON e GEAPON, porém a fibra ótica e os *splitters* são fatores constantes na ODN no que se refere ao cálculo das perdas inerentes a esses componentes da rede.

Outros componentes como caixas de terminação ótica – CTO que geralmente são ancorados nos postes e cabos Drop que fazem a conexão entre a ONU e a rede através das CTOs, são comumente utilizados em redes óticas de distribuição sendo empregados para fazer a conexão dos usuários à rede de forma mais simples. No apêndice A trata-se um pouco sobre

esses componentes bem como ilustra-se alguns exemplares dos mesmos para uma melhor exemplificação de suas aplicações.

4.2.1 Perdas na fibra ótica

A fibra ótica utilizada em ambas as tecnologias é a monomodo, a qual possui uma atenuação menor e conseqüentemente podendo atingir distancias maiores. O transporte de dados pela fibra ótica ocorre através da luz que é injetada se propagando pela mesma até chegar na outra ponta da rede, como a luz se encontra em uma região muito superior no espectro, ou seja, na ordem de centenas de THZ, utiliza-se o comprimento de onda como referência. A relação entre o comprimento de onda e a frequência é dado pela fórmula:

$$\lambda = c/f \quad (3)$$

onde, λ indica o comprimento de onda; c indica a constante da velocidade da luz = $3 \times 10^8 m/s^2$; f indica a frequência em HZ.

Emprega-se na fibra ótica o processo WDM, ou seja, multiplexação por divisão de comprimento de onda e a atenuação na fibra leva em consideração o valor do comprimento de onda bem como a distância que a mesma possui. Tanto a GPON quanto a GEPON trabalham com os comprimentos de onda em torno de 1490nm *downstream* e 1310nm *upstream*, portanto as perdas na fibra no sentido de ida e de volta serão diferentes como é mostrado na tabela a seguir.

Tabela 8 – Atenuação por Km de fibras óticas.

| Comprimento de onda | Perdas na fibra |
|---------------------|-----------------|
| 1310nm | 0,36dB/Km |
| 1490nm | 0,24dB/Km |

Fonte: Adaptado de Fiberwave, 2016; [32]

4.2.2 Perdas em *splitters*, fusões e conectores.

A rede PON pode conter os *splitters* que são responsáveis por fazer a divisão do sinal ótico que está sendo transmitido pela fibra, foi visto que pode ser balanceado e desbalanceado. Quando se insere um *splitter* na rede, insere-se também uma atenuação causada por esse dispositivo, a qual varia de acordo com a quantidade de divisão pelo mesmo e também com a característica balanceada ou desbalanceada do divisor ótico, como pode-se observar nas tabelas a seguir.

Tabela 9 – Atenuação em *splitters* balanceados.

| <i>Splitters</i> /divisões | 1x2 | 1x4 | 1x8 | 1x16 | 1x32 | 1x64 |
|----------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Perda de inserção MAX | 3,7dB | 7,1dB | 10,5dB | 13,7dB | 17,1dB | 20,5dB |
| Perda de Retorno | >55dB | | | | | |

Fonte: Adaptado de Furukawa, 2028; [33]

Tabela 10 – Atenuação em *splitters* desbalanceados.

| Spliters/ porcentagem de divisão | 1/99 | 5/95 | 10/90 | 20/80 | 25/75 | 30/70 | 40/60 | 45/55 |
|--|-------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|---------------|-----------------|-------------------|
| Perda de inserção MAX (dB) | 21,6 X 0,30 | 14,6 X 0,5 | 11,0 X 0,7 | 7,9 X 1,4 | 6,95 X 1,7 | 6 X 1,9 | 4,7 X 2,7 | 4,15 X 3,15 |
| Perda de Retorno (dB) | >55 | | | | | | | |

Fonte: Adaptado de Furukawa, 2018; [34]

A fusão de duas fibras óticas oferece uma atenuação muito pequena e é feita através de uma máquina de fusão de fibra ótica, a perda nessas emendas gira em torno de 0,1dB a 0,01dB.

Figura 21 - Máquina de fusão Fujikura 26S.



Fonte: Cianet; [38]

Os conectores óticos posicionam as fibras de forma que fiquem bem aproximadas umas das outras e possui uma estrutura mecânica que dá estabilidade à conexão e possui um ferrolho que é um cilindro mecânico com um furo central por onde a fibra passa. Os conectores possuem uma atenuação que gira em torno de 0,35Db [35].

4.2.3 Orçamento de potência

O orçamento de potência é o cálculo feito na rede de distribuição que leva em consideração a potência fornecida pelos transmissores tanto da OLT quanto da ONU, descontando-se as atenuações presentes na rede ótica de distribuição nos sentidos *downstream* e *upstream*. Esse orçamento serve para que a distribuição da rede seja implementada de uma forma que todas os ativos da rede possam se comunicar sem qualquer dificuldade, fazendo com que o tráfego de dados entre as OLTs e as ONUs ocorram de uma forma segura e eficiente. Neste estudo usa-se a topologia de árvore para fins de cálculo, bem como potência de transmissão igual para a OLT e ONU, ficando ainda mais clara a diferença na atenuação da rede quando se utilizam comprimentos de ondas distintos.

Para ambos ativos OLT e ONU foi estabelecida uma potência de transmissão de 5dBm e uma sensibilidade mínima de recepção de -28dBm e máxima de -8dBm. A equação para o cálculo do orçamento de potência neste exemplo é:

$$Pr = Ptx - Pc - Pf - Ps - (d * Pw) \quad (4)$$

Onde, Pr indica a potência de sinal recebida;

Ptx indica a potência de transmissão;

Pc indica a atenuação nos conectores;

Pf indica a atenuação nos pontos de fusão;

Ps indica a atenuação nos *splitters*;

d indica a distância entre os ativos;

Pw indica a atenuação na fibra por Km em relação ao comprimento de onda.

Levando em consideração os valores apresentados na Figura 22 e comprimento de onda de 1490 nm, transmissão *downstream*, tem-se:

$$Ptx = 5dBm$$

$$Pc = 0,35 + 0,35 = 0,7dB$$

$$Pf = 6 \times 0,1 = 0,6dB$$

$$Ps = 3,7 + 7,1 + 10,5 = 21,3dB$$

$$(d * Pw) = 5 \times 0,24 = 1,2dB$$

Substituindo os valores acima na equação (4), tem-se:

$$Pr = 5 - 0,7 - 0,6 - 21,3 - 1,2 = -18,8dBm$$

Para o cálculo no sentido *upstream*, o único elemento da equação (4) que irá sofrer modificação é a atenuação na fibra devido ao comprimento de onda ser 1310 nm e a potência

de transmissão a qual é a mesma neste exemplo em ambos os sentidos do tráfego, sendo assim constante como os demais elementos da equação; portanto, tem-se:

$$(d * Pw) = 5 \times 0,36 = 1,8dB$$

Substituindo os valores encontrados na equação (4) tem-se:

$$Pr = 5 - 0,7 - 0,6 - 21,3 - 1,8 = -19,4dBm$$

Verifica-se que existe uma diferença no valor do orçamento de potência quando se varia o comprimento de onda. No sentido *upstream* que utiliza um comprimento de onda em torno de 1310nm obteve-se uma atenuação maior quando comparado com o sentido *downstream* que utiliza comprimento de onda em torno de 1490nm, os valores estão dispostos na tabela:

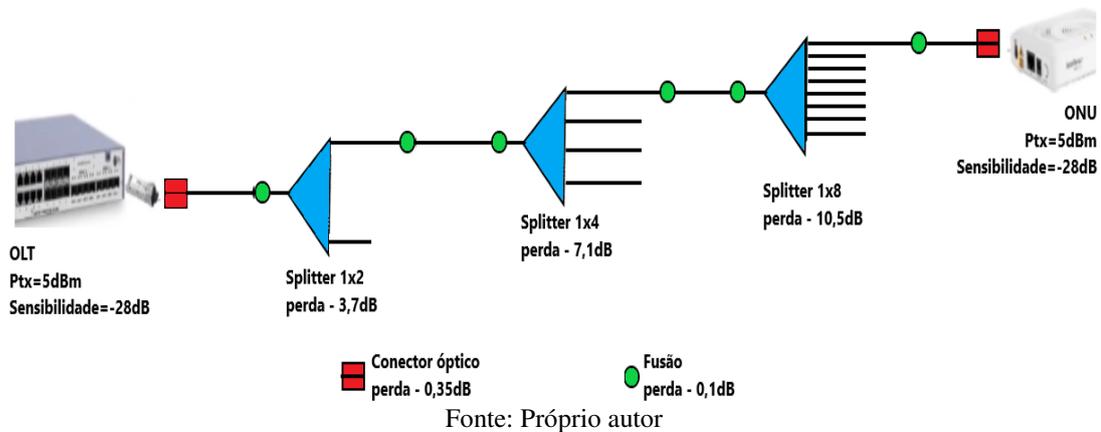
Tabela 11 – Faixa de sensibilidade e valores calculados *downstream* e *upstream*

| | Sensibilidade MAX e MIN especificada no exemplo | Potência recebida calculada |
|---|--|------------------------------------|
| Sentido <i>Downstream</i> (1490nm) | Máx de -8dBm Min de -28dBm | -18,8dBm |
| Sentido <i>Upstream</i> (1310nm) | Máx de -8dBm Min de -28dBm | -19,4dBm |

Fonte: Próprio autor

Fazendo a análise dos valores da tabela acima verifica-se que a potência recebida tanto pela OLT quanto pela ONU (OLT e ONU sinalizados na figura X) está dentro da faixa de operação de cada dispositivo, permitindo assim a troca de dados entre ambos os dispositivos sem que haja perda de informação devido às atenuações contidas na rede de distribuição ótica, tendo margem em torno de 10dBm.

Figura 22 – Rede de distribuição ótica para cálculo de orçamento de potência.
Distância 5 Km



É importante salientar que em uma rede de distribuição ótica as ONUs estão situadas em locais diferentes umas das outras e, portanto, cada uma tem um orçamento de potência específico, os quais podem ser ou não similares. Quando se faz a instalação de um novo usuário, a potência recebida é medida através de aparelhos medidores de potência de fibra ótica geralmente denominados *POWERMETER*, fazendo assim a aferição da intensidade do sinal naquele ponto específico da rede.

Figura 23 - *Powermeter* Overteck Ot-300A.



Fonte: Mercado Livre; [39]

4.2.4 Comparativo Econômico

Uma análise básica da diferença entre o custo financeiro das duas tecnologias levando em consideração apenas os ativos da rede ótica de distribuição, ou seja., as OLTs e ONUs, é

abordada neste estudo; uma vez que será considerado a mesma taxa de divisão ótica na ODN de 64 usuários por porta PON de cada OLT tanto na tecnologia GEPON quanto na GPON. A análise será feita também em cima da demanda de uma quantidade de 1000 usuários conectados à rede de distribuição, onde é abordado diferentes taxas de transmissão que variam entre 1 a 100Mb/s. Para o cálculo da demanda, tomou-se por base a eficiência da taxa de transmissão fornecida por empresas desenvolvedoras dos equipamentos que utilizam essas tecnologias, tais como Intelbras e Cianet. Para a tecnologia GEPON é fixada uma taxa de eficiência de cerca de 70% e para a GPON uma taxa de eficiência de cerca de 93%, resultando assim em uma largura de banda útil disponível para o usuário de 875Mb/s e 2325 MB/s respectivamente. Este é um cenário teórico onde os cálculos são feitos baseados na carga útil da taxa de transmissão de cada tecnologia e que os usuários utilizam toda a largura de banda requerida durante todo o tempo.

Através de uma breve pesquisa de mercado verificou-se que o preço de uma OLT com 8 portas GPON da Intelbras modelo OLT 8820 G custa cerca de R\$ 22.000,00, enquanto que uma OLT com 4 portas GEPON da Intelbras modelo OLT 4840 E custa cerca de R\$ 7.000,00; para os valores das ONUs foi escolhido um modelo híbrido ONU 110 da Intelbras que suporta ambas as tecnologias GEPON e GPON e custa cerca de R\$200,00. O custo da rede ótica de distribuição não foi levado em consideração uma vez que a mesma rede pode ser utilizado por ambas as tecnologias, assim como o valor das ONUs que neste caso em específico possui valores iguais para a GEPON e GPON.

Verifica-se que a partir do momento em que a largura de banda por usuário vai aumentando, a quantidade de OLT requisitada para atender o aumento da demanda é menor na rede gerenciada pela tecnologia GPON do que na tecnologia GEPON, sendo uma consequência da maior eficiência fornecida por essa tecnologia assim como sua capacidade maior de largura de banda.

Ao analisar as tabelas 12 e 13, observa-se que para uma taxa de transmissão de 100Mb/s por usuário e em um cenário de 1000 assinantes são necessárias 44 portas PON da tecnologia GPON e conseqüentemente 6 OLTs 8820 G para suprir a demanda, enquanto que para a GEPON são necessárias 125 portas PON e conseqüentemente 32 OLTs 4840 E para atender a mesma demanda. A razão da quantidade de portas PON requisitadas entre GEPON e GPON neste cenário é de 2,84:1 o que caracteriza um gasto maior na aquisição de OLTs por parte da tecnologia GEPON para acomodar essa taxa de transmissão.

Fazendo a análise das mesmas tabelas supracitadas, verifica-se que para taxas de transmissão baixas a quantidade de portas PON necessárias para suprir a demanda são iguais

em ambas as tecnologias, ou seja, possuindo a razão de 1:1 e, conseqüentemente, atestando um custo menor quando se aplicado a tecnologia GEPON tendo em vista que suas OLTs são equipamentos mais baratos em relação à GPON.

Tabela 12 – Dimensionamento das redes GPON e GEPON (a)

| BW (Mb/s) | 1 | 2 | 5 | 10 |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ONU-GPON | 64 | 64 | 64 | 64 |
| Portas PON-GPON | 16 | 16 | 16 | 16 |
| OLTs-GPON | 2 | 2 | 2 | 2 |
| ONU-GEPON | 64 | 64 | 64 | 64 |
| Portas PON-GEPON | 16 | 16 | 16 | 16 |
| OLTs-GEPON | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Razão entre PONs GEPON e GPON | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Custo GPON (R\$) | 44.000,00 | 44.000,00 | 44.000,00 | 44.000,00 |
| Custo GEPON (R\$) | 28.000,00 | 28.000,00 | 28.000,00 | 28.000,00 |

Fonte: Próprio autor

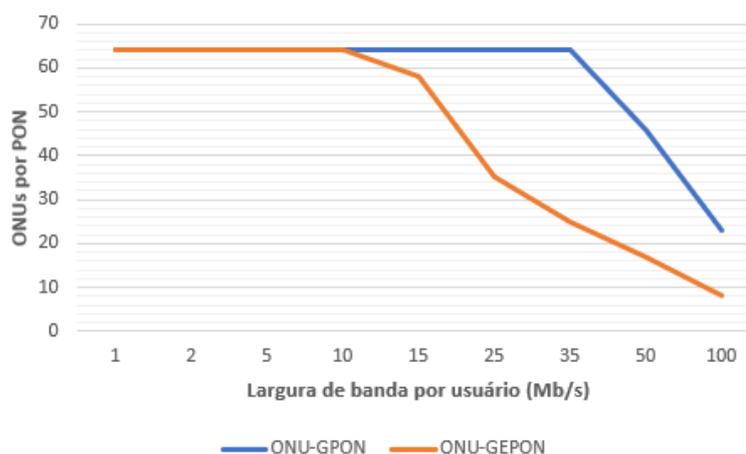
Tabela 13 – Dimensionamento das redes GPON e GEPON (b)

| BW (Mb/s) | 15 | 25 | 35 | 50 | 100 |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| ONU-GPON | 64 | 64 | 64 | 46 | 23 |
| Portas PON-GPON | 16 | 16 | 16 | 22 | 44 |
| OLTs-GPON | 2 | 2 | 2 | 3 | 6 |
| ONU-GEPON | 58 | 35 | 25 | 17 | 8 |
| Portas PON-GEPON | 18 | 29 | 40 | 59 | 125 |
| OLTs-GEPON | 5 | 8 | 10 | 15 | 32 |
| Razão entre PONs GEPON e GPON | 1,125 | 1,81 | 2,5 | 2,68 | 2,84 |
| Custo GPON (R\$) | 44.000,00 | 44.000,00 | 44.000,00 | 66.000,00 | 132.000,00 |
| Custo GEPON (R\$) | 35.000,00 | 56.000,00 | 70.000,00 | 105.000,00 | 224.000,00 |

Fonte: Próprio autor

A figura 24 ilustra de forma comparativa o comportamento do número de ONUs necessárias em ambas as tecnologias a partir do momento que as taxas de transmissão vão aumentando de 1 a 100Mb/s, observa-se claramente que a GPON consegue manter uma quantidade maior de usuários por porta PON mesmo quando há um aumento significativo na banda fornecida para o usuário, enquanto que a EPON sofre um impacto considerável já nas taxas de transmissão a partir de 25Mb/s por usuário.

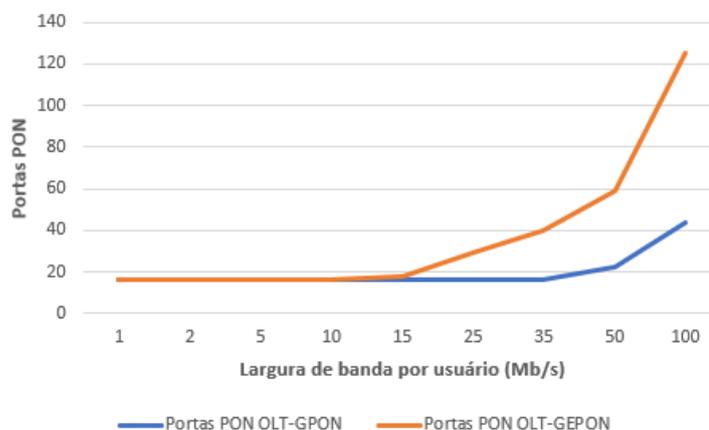
Figura 24 – Variação da quantidade de ONUs por PON em relação ao aumento da largura de banda.



Fonte: Próprio autor

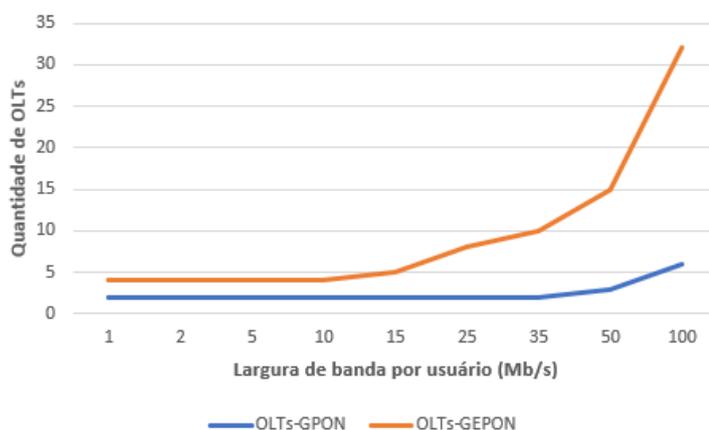
As Figuras 25 e 26 ilustram de forma comparativa o aumento da quantidade de portas PON necessárias para atender o aumento de largura de banda disponível para os usuários, observa-se que entre as taxas de transmissão de 1 a 10 Mb/s por usuário a quantidade de portas PON em ambas as tecnologias permanecem iguais, enquanto que a partir de 15Mb/s por usuário a quantidade de portas PON vai crescendo de forma significativa chegando a um valor de 125 portas PON para a GEPON e 44 portas PON para a GPON em uma taxa de transmissão de 100Mb/s. Por consequência, há um aumento na quantidade de OLTs para ambas as tecnologias, o que ocorre em uma proporção maior para a tecnologia GEPON do que na tecnologia GPON. Isso se dá ao fato de que a rede GEPON esgota os seus recursos mais rapidamente quando se aumenta o valor da taxa de transmissão por usuário, o que demanda uma maior largura de banda da tecnologia, e uma vez que a GPON possui duas vezes mais largura de banda no sentido *downstream* ela consegue ser menos sensível a esse aumento de demanda.

Figura 25 - Variação da quantidade de portas PON em relação ao aumento da largura de banda.



Fonte: Próprio autor

Figura 26 - Variação da quantidade de OLTs em relação ao aumento da largura de banda.

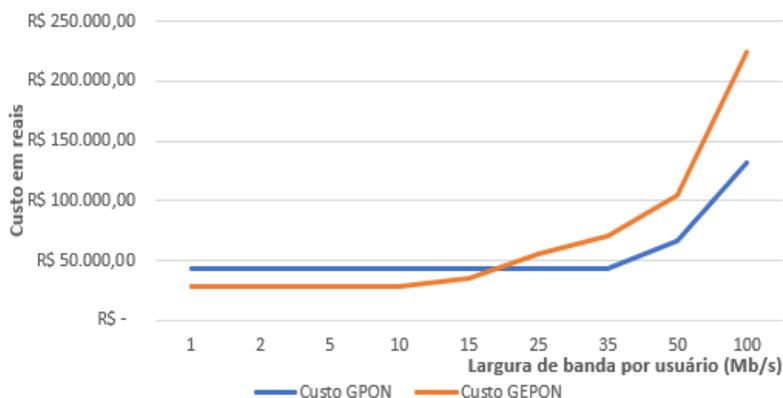


Fonte: Próprio autor

Nesta análise, para o modelo de ONU escolhido o custo financeiro para ambas as tecnologias é o mesmo, assim como o custo com a própria rede de distribuição juntamente com seus componentes passivos. Logo, para a verificação do custo da implementação frisando a diferença entre os valores das tecnologias levou-se em consideração apenas os valores das OLTs apresentadas neste estudo no segundo parágrafo deste subcapítulo. Como foi observado nas Figuras 25 e 26, há um aumento da quantidade de OLTs necessárias para atender o aumento na demanda por usuário e constatou-se que na tecnologia GEPON esse aumento é mais significativo. Isso faz com que o custo com este ativo nesta rede seja maior que na rede GPON; embora os modelos de OLT GEPON sejam mais baratos, o aumento visível de OLTs faz com que esse custo menor se torne maior pela quantidade de equipamentos necessários para atender a demanda. Observa-se que para as taxas de transmissão de 1 a 10Mb/s o custo com as OLTs

da tecnologia GPON é maior, porém quando a taxa de transmissão por usuário aumenta a partir dos 15Mb/s tem-se que o custo com as OLTs da GEPON aumenta de forma substancial, superando os custos que a rede GPON tem com esse ativo.

Figura 27 - Variação do custo em relação ao aumento da largura de banda.



Fonte: Próprio autor

Vale ressaltar que para serviços que demandem uma largura de banda mais alta como o serviço de *streaming* fornecido pela empresa NETFLIX que recomendam uma taxa de transmissão de 25Mb/s para a reprodução fluída de um conteúdo em 4K, uma maior largura de banda disponível para o usuário se faz necessária e, nestes casos, a rede GPON possui uma vantagem de custo e de desempenho.

5 CONCLUSÃO

No presente capítulo são apresentadas as conclusões provenientes do trabalho desenvolvido, bem como sugestões de temas a serem abordados em trabalhos futuros.

Tendo em vista o estudo teórico e o entendimento das principais características de ambas as tecnologias GPON e GEPON, as principais diferenças existentes entre elas foram abordadas com efeito comparativo, levando em consideração aspectos como largura de banda, taxa de divisão ótica, alcance, encapsulamento, segurança, e etc. Além disso, fatores como implantação das redes óticas e custo financeiro das tecnologias GPON e GEPON também foram objeto de estudo discutido neste trabalho.

Ao analisar as características de ambas as redes GPON e GEPON, observou-se que ambas as tecnologias possuem uma qualidade alta no que se refere à prestação de serviço ao usuário final, justamente por utilizar a fibra ótica como meio físico para a transmissão de dados, o que aumenta a confiabilidade da rede, o sigilo da mesma e a capacidade de transporte de dados. Além disso observou-se que a tecnologia GPON é de fato superior à GEPON, possuindo o dobro da largura de banda no sentido *downstream* e podendo fornecer uma maior quantidade de serviços que demandam uma taxa de transmissão de dados maior. Apesar de ser uma tecnologia mais complexa e possuir uma maior quantidade de protocolos, a GPON ainda assim se mostra mais eficiente que a GEPON devido ao tamanho de seu cabeçalho reduzido, fazendo com que uma taxa maior da largura de banda oferecida seja utilizada de fato com os dados úteis do usuário.

Observou-se, no capítulo 4, o custo financeiro de ambas as tecnologias, quesito esse de fundamental importância para pequenos e grandes provedores de internet na hora de planejar e implantar suas redes óticas de distribuição. Constatou-se que a tecnologia GPON consegue suprir serviços que necessitam de uma quantidade considerável de largura de banda, obtendo vantagem financeira sobre a GEPON a partir dos 25Mb/s por usuário, taxa de transmissão bem comum no cenário atual de provedores de médio e grande porte. Enquanto que a tecnologia GEPON obtém vantagem financeira sobre a GPON em taxas de transmissão menores, que variam de 1 a 15Mb/s, taxa de transmissão essa que atende de uma forma razoável os serviços mais atuais como *Video on Demand*, HTDV e *streaming*, que dependendo da qualidade do vídeo necessitam de uma largura de banda que pode variar entre 3 a 25Mb/s.

Conclui-se de fato que um estudo sobre o perfil de usuários e a quantidade em potencial de usuários que poderão fazer parte da rede se faz extremamente necessário para a escolha da implantação da tecnologia GPON ou GEPON, pois a GEPON consegue atender perfeitamente

uma quantidade menor de usuários e serviços que demandam uma menor largura de banda, conseguindo assim manter-se com uma boa relação custo-benefício, fato esse que se perde ao ponto que uma maior quantidade de usuários e de largura de banda por usuário é requerida da rede. A tecnologia GPON apresenta vantagens econômicas para redes de distribuição que atendam uma quantidade bem maior de clientes bem como uma demanda maior de largura de banda por usuário, podendo assim atender uma região bem maior, enquanto que para regiões pequenas, com poucos usuários e serviços de pouca demanda, se mostra uma tecnologia extremamente cara e inviável.

Trabalhos Futuros

Algumas possibilidades de trabalhos futuros incluem:

Um estudo detalhado sobre a evoluções dessas tecnologias para as taxas de mais de 10Gbit/s conhecidas como XGPON e NG-EPON, fazendo um comparativo entre as suas principais características e abordando as suas melhorias.

A possibilidade de, com a ajuda oriunda conhecimentos adquiridos neste estudo, planejar, orçar e implementar pequenas e médias cidades digitais utilizando as tecnologias abordadas neste trabalho.

ANEXO

Anexo A

Cabos Drop

Como as estruturas FTTH foram sendo cada vez mais utilizadas, os fabricantes sentiram a necessidade de fabricar cabos que atendessem de forma mais adequada a parte final da rede de distribuição, ou seja, que vão desde as caixas de terminações óticas (CTO) até o usuário conectando-se à ONU. Esses cabos são normalmente chamados de cabos DROP e a grande maioria dos fabricantes recomendam que ele se estenda por no máximo 400m e em vãos de cerca de 80m a 200m.

Algumas características do cabo Drop são:

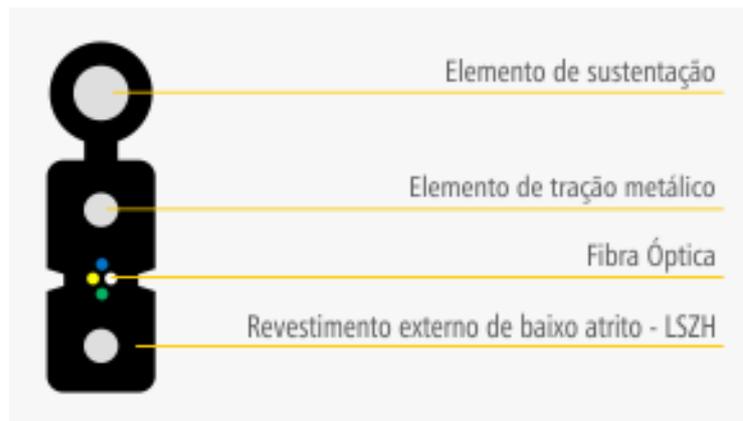
Insensível a perdas por curvas – o que permite que manobras e curvas sejam feitas com o cabo Drop nas CTOs e nas residências do usuário com maior segurança;

Dimensão reduzida – possui diâmetro externo otimizado, fazendo com que a carga de tração no fio seja reduzida e reduzindo o uso de materiais de apoio à instalação do cabo Drop.

Praticidade na instalação – possui uma facilidade na decapagem e permite o acoplamento de conectores de forma mais rápida;

Robustez – mesmo com dimensão reduzida possui boas características mecânicas e elementos de sustentação que são galvanizados [41].

Figura A.1 – Cabo ótico Drop compacto.



Fonte: ZTTCable; [42]

Figura A.2 – Cabo Drop óptico compacto.



Fonte: Ispshop; [43]

Figura A.3 – Cabo óptico Drop figura 8.



Fonte: ZTTCable; [42]

Caixa de Terminação Ótica – CTO

As caixas de terminação ótica são pontos de acesso que fazem a conexão do usuário à rede de distribuição através de cabos drop, é muito comum que essas caixas acomodem o ponto de divisão ótica, *splitters*, aumentando assim a quantidade de usuários a serem atendidos, devido a este fato também é conhecida como caixa de atendimento.

Figura A.4 - Caixa de Terminação ótica CTO.



Fonte: Mercado Livre; [44]

Figura A.5 – CTO instalada em poste de energia.



Fonte: Adrenalina, 2018; [45].

REFERÊNCIAS

- [1] Carvalho, A; Badinhan, L. **Habilitação técnica em Eletrônica: Eletrônica Telecomunicações**. 5. ed. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.
- [2] S, C, Grady. **The book on FTTX From Design To Deployment: A Practical Guide To FTTX Infrastructure**. ADC Telecommunications INC, 2005.
- [3] ZTTCable. **Fibra Ótica – O processo de fabricação e os tipos de fibra**. [Online]. Disponível em <http://www.zttcable.com.br/fibra_optica/>. Acesso em novembro 2018.
- [4] **Sumitomo achieves 10 petabits/s over multicore, multimode fiber**, 2017. [Online]. Disponível em <<http://optics.org/news/8/10/23>>. Acesso em novembro de 2018.
- [5] Teleco. **Fibra Óptica I: Introdução**. [Online]. <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialsolfo1/pagina_1.asp>. Acesso em novembro de 2018.
- [6] Pinheiro, José. **PON – Conheça como é a estrutura da rede**, 2016. [Online]. Disponível em <<https://www.ispblog.com.br/2016/09/16/estrutura-pon/>>. Acesso em novembro de 2018.
- [7] Intelbras. **OLT 8820G 8 Portas GPON**. [Online]. Disponível em <<http://www.intelbras.com.br/empresarial/pon/gpon/olt-8820-g>>. Acesso em novembro de 2018.
- [8] Intelbras. **ONU 110 – 1 Porta Gigabit Ethernet**. [Online]. Disponível em <<http://www.intelbras.com.br/empresarial/onu-110>>. Acesso em novembro de 2018.
- [9] SupriNordeste. **Splitter Ótico PLC Conectorizado**. [Online]. Disponível em <<http://www.suprinordeste.com.br/produto/splitter-optico-plc-conectorizado>>. Acesso em novembro de 2018.
- [10] Cianet. **Porque utilizar a arquitetura de redes FTTX**, 2016. [Online]. Disponível em <<https://www.cianet.com.br/blog/infraestrutura-e-tecnologia/por-que-utilizar-a-arquitetura-de-redes-fttx/>>. Acesso em novembro de 2018.
- [11] C. Lin, **Broadband optical Access Networks and Fiber-to-the-Home**. Editora John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [12] KEISER, Gerd. **Comunicações por Fibras Óticas**. 4. ed. Porto Alegre: Amgh, 2014.
- [13] Teleco. **PON: Características**. [Online]. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialpon/pagina_2.asp>. Acesso em novembro de 2018.

- [14] IspBlog. **Splitter**: entenda o que é e os seus modelos. [Online]. Disponível em <<https://www.ispblog.com.br/2016/10/31/splitter-entenda-o-que-e-os-seus-modelos/>>. Acesso em novembro de 2018.
- [15] Redes&Cia. **FTTX** – entenda o que é FTTX, 2014. [Online]. Disponível em <<http://www.redesecia.com.br/fibra-optica/fttx-entenda-o-que-e-fttx/>>. Acesso em novembro de 2018.
- [16] IBGE. **Acesso à Internet e à Televisão e Posse de Telefone Móvel Celular para uso Pessoal**, 2016. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em novembro de 2018.
- [17] Anatel. **Banda Larga fixa cresce 2,43 milhões de contratos nos últimos 12 meses**, 2018. [Online]. Disponível em <<http://www.anatel.gov.br/institucional/noticias-destaque/2097-banda-larga-fixa-cresce-2-43-milhoes-de-contratos-nos-ultimos-12-meses>>. Acesso em novembro de 2018.
- [18] Hood, D.; Trojer, E. **Gigabit-capable Passive Optical Networks**. Editora John Wiley & Sons, New Jersey, 2012.
- [19] Recommendation **ITU-T G.984.1. Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics**, 2008.
- [20] Recommendation **ITU-T G.984.2. Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification**, 2003.
- [21] Recommendation **ITU-T G.984.7. Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Long reach**, 2010.
- [22] Beck M. **Ethernet in the First Mile**, 2011. [Online]. Disponível em <http://www.Ethernetinthefirstmile.com/faq_gen.html#1>. Acesso em dezembro de 2018.
- [23] **IEEE 802.3 SECTION 3**, 2015. [Online]. Disponível em <https://standards.ieee.org/standard/802_3-2015.html>. Acesso em dezembro de 2018.
- [24] **IEEE 802.3 SECTION 5**, 2015. [Online]. Disponível em <https://standards.ieee.org/standard/802_3-2015.html> Acesso em dezembro de 2018.
- [25] Pires, João. **Redes de Telecomunicações**, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Redes e Sistemas de Comunicação) - ISUTC/IST. [Online]. Disponível em <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779573650253/RT_Mersec_1.pdf>. Acesso em dezembro de 2018.
- [26] Ansari, N; Zhang, J. **Media Access Control and Resource Allocation: For Next Generation Passive Optical Networks**, 2013.

- [27] **IEEE 802.3 SECTION 1**, 2015. [Online]. Disponível em <https://standards.ieee.org/standard/802_3-2015.html>. Acesso em dezembro de 2018.
- [28] Moradpoor, Naghmeh. **Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time (IPACT) Implementations Using OPNET**. In: OPNET's annual technology conference. Washington DC, USA, 2011.
- [29] University of Freiburg – Computer Science. **Communication Systems: Ethernet**. [Online]. Disponível em: <<http://archive.cone.informatik.uni-freiburg.de/teaching/vorlesung/communication-systems-nw-II-w09/Slides/CommSys-102-Ethernet-ARP.pdf>>. Acesso em dezembro de 2018.
- [30] Recommendation **ITU-T G.984.3. Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Transmission Convergence Layer**, 2014.
- [31] Parmar, U; Carvalho F. **Estudo de algoritmos em redes PON**. In: Seminário de Redes e Sistemas de Telecomunicações. INATEL, 2014.
- [32] Fiberwave. **Specification: Optical Fiber Cable**, 2016. [Online]. Disponível em <<http://fiberwave.com/wp-content/uploads/2016/09/FWLooseTubeGelFilled.pdf>>. Acesso em dezembro de 2018.
- [33] Furukawa. **Splitter Ótico 1XN Balanceado**, 2018. [Online]. Disponível em <https://www.furukawalatam.com/pt_BR/versao-et-pdf/splitter-optico-1xn-balanceado/Furukawa>. Acesso em dezembro de 2018.
- [34] Furukawa. **Splitter Ótico 1XN Desbalanceado**, 2018. [Online]. Disponível em <<https://www.furukawalatam.com/pt-br/versao-et-pdf/splitter-optico-1xn-desbalanceado>>. Acesso em dezembro de 2018.
- [35] **Emendas Óticas**, Instituto Federal de Santa Catarina. [Online]. Disponível em <http://www.sj.ifsc.edu.br/~saul/sistemas%20opticos/SIO_7_emendas%20opticas%2014.pdf>. Acesso em dezembro de 2018.
- [36] D. Sala and A. Gummalla, **PON functional requirements: services and performance**, In: IEEE 802.3ah *Ethernet* in the First Mile meeting, Portland, Oregon, 2001. [Online]. Disponível em <http://www.ieee802.org/3/efm/public/jul01/presentations/sala_1_0701.pdf>. Acesso em janeiro de 2018.
- [37] Hajduczenia, M.; Da Silva, H.; Monteiro, P. **EPON versus APON and GPON: a detailed performance comparison**. In: Journal of Optical Networks, 2006.
- [38] Cianet. **Máquina de Fusão – Fujikura 26S**. [Online]. Disponível em: <https://www.cianet.com.br/produtos/ferramentas/ferramentas-ferramentas/maquina-de-fusao-fujikura-26s?gclid=CjwKCAiAy-_iBRAaEiwAYhSlA_Wq2hi0gpqZ6hX6FrA0A>

- CNaW0sX-wenBxhAdzSTTFL8uUYH0M7wxhoCcVEQAvD_BwE>. Acesso em janeiro de 2019.
- [39] Mercado Livre. **Power Meter Ot-300A**. [Online]. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-966574848-power-meter-ot-300a-para-teste-de-splitter-fibra-optica-_JM?quantity=1>. Acesso em janeiro de 2019.
- [41] Infortel. **O que são cabos do tipo “drop” e como utilizá-los**, 2015. [online]. Disponível em: <<http://www.inforteltelecom.com.br/?p=5104>>. Acesso em janeiro de 2019.
- [42] ZTTCable. **Cabo Óptico compacto, figura 8 e ASU – Qual a diferença?**. [Online]. Disponível em: <<https://www.zttcable.com.br/qual-o-melhor-cabo-para-sua-rede/>>. Acesso em janeiro de 2019.
- [43] Ispshop. **Cabo Drop Flat Compacto Metálico**. [Online]. Disponível em: <<https://www.ispshop.com.br/cabo-optico-drop-flat-compacto-metalico-low-friction1000m.html>>. Acesso em janeiro de 2019.
- [44] Mercado Livre. **Kit/10 Caixas de Atendimento com Splitter**. [Online]. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1083739720-kit10-caixas-de-atendimento-com-splitter-1x16-sc-apc-_JM>. Acesso em janeiro de 2019.
- [45] Adrenalina. **Banda Larga**, 2018. [Online]. Disponível em: <<https://adrenaline.uol.com.br/forum/threads/banda-larga-tim-live-xdsl-vdsl-fibra-optica.447175/page-648>>. Acesso em janeiro de 2019.
- [46] Kramer, Glen. **How Efficient is EPON**. Teknovus, Inc. [Online]. Disponível em: <http://www.ieee802.org/3/efm/public/p2mp_email/pdf00001.pdf>. Acesso em janeiro de 2019.