

ANTONIO CARLOS FERREIRA DO VALLE

**AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO NO DOMÍNIO ÓPTICO  
PARA TRANSMISSÃO NA ÚLTIMA MILHA DE SINAIS MULTIMÍDIA  
DE BANDA LARGA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas Ópticos.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. PAULA BRANDÃO HARBOE

Niterói  
2012

## Ficha Catalográfica

ANTÔNIO CARLOS FERREIRA DO VALLE

**AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO NO DOMÍNIO ÓPTICO  
PARA TRANSMISSÃO NA ÚLTIMA MILHA  
DE SINAIS MULTIMÍDIA DE BANDA LARGA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas Ópticos.

Aprovada em 07 de novembro de 2012.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dra. PAULA BRANDÃO HARBOE – Orientadora  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Dr. EDUARDO RODRIGUES VALE  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Dra. VANESSA PRZYBYLSKI RIBEIRO MAGRI  
PUC – Rio / CETUC

---

Prof. Dr. JOSÉ RODOLFO SOUZA  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Niterói  
2012

Dedico à minha família, em especial à minha esposa, pelo carinho e apoio irrestritos na minha trajetória, propiciando as condições necessárias para a realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me proporcionar mais este desafio de vida, por me dar condições físicas e mentais para desenvolver este trabalho e por colocar em minha vida as pessoas que me auxiliaram em mais esta jornada.

À minha estimada orientadora, Prof. Dra. Paula Brandão Harboe, pela presteza em me orientar, pela dedicação, pelo conhecimento socializado, não medindo esforços, paciência e atenção necessários para atingirmos nossa meta.

Aos meus amigos e familiares colaboradores, em especial aos amigos Valério, Paulo Faillace, Fernanda e ao primo Miguel, para os quais tive a oportunidade de apresentar o presente estudo, recebendo deles valorosas contribuições.

## SUMÁRIO

|                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                    | <b>17</b>  |
| 1.1 SOLUÇÕES PARA A REDE DE ACESSO.....                       | 21         |
| 1.2 OBJETIVO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....                   | 23         |
| <b>2. REDE ÓPTICA PASSIVA: CONCEITOS E ARQUITETURAS .....</b> | <b>24</b>  |
| 2.1 ARQUITETURA BÁSICA DE REDES PON .....                     | 24         |
| 2.2 REDES TDM-PON .....                                       | 27         |
| <b>2.2.1 Padronização de Redes TDM-PON .....</b>              | <b>30</b>  |
| 2.2.1.1 Broadband PON (BPON) .....                            | 32         |
| 2.2.1.2 Ethernet PON (EPON).....                              | 32         |
| 2.2.1.3 Gigabit PON (GPON).....                               | 32         |
| 2.3 REDES WDM-PON.....                                        | 33         |
| 2.4 REDES OCDMA-PON .....                                     | 36         |
| 2.5 REDES HÍBRIDAS .....                                      | 40         |
| 2.6 COMPONENTES EM UMA REDE ODN .....                         | 47         |
| <b>3 AVALIAÇÃO DAS REDES PON.....</b>                         | <b>51</b>  |
| 3.1 PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DA REDE GPON – EMBRATEL .....      | 51         |
| <b>3.1.1 Visão Geral da Rede Embratel .....</b>               | <b>52</b>  |
| <b>3.1.2 Descrição do projeto .....</b>                       | <b>53</b>  |
| <b>3.1.3 Parâmetros de teste usados no projeto.....</b>       | <b>59</b>  |
| <b>3.1.4 Testes de campo realizados .....</b>                 | <b>62</b>  |
| <b>3.1.5 Análise de custos GPON vs Soluções atuais.....</b>   | <b>64</b>  |
| 3.2 SIMULAÇÕES .....                                          | 68         |
| <b>3.2.1 Simulação de uma Rede WPON .....</b>                 | <b>69</b>  |
| 3.2.1.1 Descrição da Topologia e Funcionamento .....          | 69         |
| 3.2.1.1 Resultados Obtidos .....                              | 72         |
| <b>3.2.2 Rede Híbrida WPON + GPON .....</b>                   | <b>76</b>  |
| 3.2.2.1 Descrição da Topologia e Funcionamento .....          | 77         |
| 3.2.2.2 Resultados Obtidos.....                               | 82         |
| <b>3.2.3 Rede OCDMA.....</b>                                  | <b>86</b>  |
| 3.2.3.1 Descrição da Topologia e Funcionamento .....          | 87         |
| 3.2.3.2 Resultados Obtidos .....                              | 91         |
| <b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                           | <b>94</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                       | <b>100</b> |
| <b>APENDICE .....</b>                                         | <b>107</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1: Ilustração esquemática de uma rede PON.....                                                                             | 25 |
| Figura 2.2: Cenário de configurações de redes FTTx.....                                                                             | 27 |
| Figura 2.3: Arquitetura básica de uma rede PON.....                                                                                 | 28 |
| Figura 2.4: Posicionamento e razão de divisão de divisores ópticos em uma rede ODN.....                                             | 29 |
| Figura 2.5: Interfaces TDM e Ethernet na OLT e ONT.....                                                                             | 30 |
| Figura 2.6: Evolução histórica dos padrões de redes TDM-PON.....                                                                    | 32 |
| Figura 2.7: Arquitetura básica de uma rede WDM-PON com AWG.....                                                                     | 34 |
| Figura 2.8: Configuração básica de rede WDM-PON com laser sintonizável.....                                                         | 35 |
| Figura 2.9: Configuração com LED super luminescente na ONT.....                                                                     | 36 |
| Figura 2.10: Codificação do bit de informação.....                                                                                  | 38 |
| Figura 2.11: Configuração básica da codificação Spread Spectrum.....                                                                | 39 |
| Figura 2.12: Configuração básica da Codificação SAC.....                                                                            | 40 |
| Figura 2.13: Configuração básica WPON/GPON com redes independentes.....                                                             | 41 |
| Figura 2.14: Configuração híbrida WPON/GPON.....                                                                                    | 42 |
| Figura 2.15: Setup de teste de sistema híbrido experimental para 128 usuários.....                                                  | 43 |
| Figura 2.16: Curva do BER versus potência de recepção: (a) <i>upstream</i> ; (b) <i>downstream</i> .....                            | 44 |
| Figura 2.17: Setup de teste utilizado na experiência Koganei-Tóquio.....                                                            | 44 |
| Figura 2.18: Análises no domínio da frequência/ tempo dos sinais de transmissão e recepção.....                                     | 46 |
| Figura 2.19: (a) BER vs. potência de TX back to back; (b) BER vs. potência de TX.....                                               | 46 |
| Figura 2.20: Divisores de potência simétrico (1:4) e assimétrico (90/10).....                                                       | 47 |
| Figura 2.21: Cascadeamento de divisores em dois e três níveis.....                                                                  | 48 |
| Figura 2.22: Conjunto de guias de onda curvos (a); AWG de 8 canais com incrementos constantes entre canais adjacentes (b).....      | 49 |
| Figura 2.23: (a): AWG fabricante JDSU, (b): AWG fabricante <i>Photonics</i> .....                                                   | 50 |
| Figura 3.24: Visão geral da rede Embratel.....                                                                                      | 53 |
| Figura 3.25: Exemplo de configuração de rede ODN adotada no projeto GPON – Embratel.....                                            | 55 |
| Figura 3.26: Distribuição de divisores de potência em uma rede ODN na cidade do Rio de Janeiro.....                                 | 57 |
| Figura 3.27: Exemplo do uso da ferramenta para representação gráfica dos elementos da rede.....                                     | 59 |
| Figura 3.28: Soluções para a rede de última milha: modem óptico + SHDSL; SDH NG + SHDSL; link de micro-ondas; link de satélite..... | 65 |

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.29: Topologia utilizada na simulação de uma rede WPON.....                                                                                               | 69 |
| Figura 3.30: Geração da sequência de teste PRBS e da portadora CW, respectivamente.....                                                                           | 70 |
| Figura 3.31: Principais parâmetros da transmissão sentido <i>downstream</i> .....                                                                                 | 71 |
| Figura 3.32: Modulador e divisor da transmissão sentido <i>downstream</i> .....                                                                                   | 71 |
| Figura 3.33: Circuladores da Transmissão e recepção.....                                                                                                          | 71 |
| Figura 3.34: Detectores utilizados nos sentidos <i>downstream</i> e <i>upstream</i> , respectivamente.....                                                        | 71 |
| Figura 3.35: Principais características do enlace óptico.....                                                                                                     | 72 |
| Figura 3.36: Características adicionais do enlace óptico simultâneos.....                                                                                         | 72 |
| Figura 3.37: Espectros de frequência das portadoras singelas / multiplexadas.....                                                                                 | 73 |
| Figura 3.38: Portadoras de recepção e transmissão.....                                                                                                            | 74 |
| Figura 3.39: Analisador de WDM – medida da potência do sinal, do ruído e de sua relação.....                                                                      | 74 |
| Figura 3.40: Potência de entrada na rede ODN no sentido <i>downstream</i> .....                                                                                   | 75 |
| Figura 3.41: Potências de saída da rede ODN no sentido <i>downstream</i> .....                                                                                    | 75 |
| Figura 3.42: Potências de recepção do <i>downstream</i> na entrada do fotodetector.....                                                                           | 76 |
| Figura 3.43: Diagrama de olho e BER de <i>upstream</i> e <i>downstream</i> .....                                                                                  | 76 |
| Figura 3.44: Topologia usada na simulação da rede híbrida WPON + GPON.....                                                                                        | 77 |
| Figura 3.45: Característica do sinal de teste aplicado nos dois sentidos.....                                                                                     | 79 |
| Figura 3.46: Parâmetros dos transmissores e receptores ópticos no sentido <i>downstream</i> .....                                                                 | 79 |
| Figura 3.47: Parâmetros dos amplificadores reflexivos usados nos dois sentidos ( <i>upstream</i> e <i>downstream</i> ).....                                       | 80 |
| Figura 3.48: Características da fibra óptica usada no enlace.....                                                                                                 | 80 |
| Figura 3.49: Filtro passa banda de recepção <i>downstream</i> .....                                                                                               | 81 |
| Figura 3.50: Transmissor e receptor lado ONU.....                                                                                                                 | 81 |
| Figura 3.51: Laser de bombeamento para travamento dos transmissores do <i>up/downstream</i> .....                                                                 | 81 |
| Figura 3.52: Filtros utilizados na recepção <i>downstream</i> .....                                                                                               | 81 |
| Figura 3.53: Portadoras singelas / multiplexadas da transmissão do <i>downstream</i> .....                                                                        | 83 |
| Figura 3.54: Portadoras de recepção do <i>upstream</i> (a) e (b) e recepção do <i>downstream</i> (c).....                                                         | 84 |
| Figura 3.55: Analisador de WDM – Medida da potência do sinal, do ruído e de sua relação.....                                                                      | 84 |
| Figura 3.56: Nível de potência óptica da TX e RX no lado da OLT ( <i>Downstream</i> ).....                                                                        | 85 |
| Figura 3.57: Nível de potência óptica da TX e RX no lado da ONU ( <i>Upstream</i> ).....                                                                          | 85 |
| Figura 3.58: Diagrama de olho e BER de <i>upstream</i> e <i>downstream</i> .....                                                                                  | 86 |
| Figura 3.59: Topologia usada na simulação da rede OCDMA.....                                                                                                      | 87 |
| Figura 3.60: Sinal de teste NRZ gerando uma sequência PRBS.....                                                                                                   | 88 |
| Figura 3.61: Características do sinal de teste de dados – Taxa de transmissão.....                                                                                | 89 |
| Figura 3.62: Modulação do sinal: (a) geração da portadora; (b) modulador Mach-Zehnder.....                                                                        | 89 |
| Figura 3.63: Codecch #1: Encoder (a); Decoder principal (b); Decoder complementar (c)....                                                                         | 89 |
| Figura 3.64: Codec ch # 2: Encoder (a); Decoder principal (a); Decoder complementar (b)..                                                                         | 89 |
| Figura 3.65: Amplificador óptico (a), combinadores e <i>splitters</i> (b) utilizado no enlace.....                                                                | 90 |
| Figura 3.66: Características da fibra óptica utilizada na rede externa (ODN).....                                                                                 | 90 |
| Figura 3.67: Parâmetros do fotodetector usado na recepção.....                                                                                                    | 90 |
| Figura 3.68: Saída do modulador Mach-Zehnder (a); Saída de todos os comprimentos de onda combinados (b); Análise do sinal em (a) obtida do analisador WDM(c)..... | 92 |
| Figura 3.69: Saída do <i>encoder</i> OCDMA CH #1 (a); Saída do decodificador principal do CH #1 (b); Saída do decodificador complementar do CH #1(c).....         | 92 |
| Figura 3.70: Saída do <i>encoder</i> OCDMA #2(a); Saída do <i>encoder</i> OCDMA # 3(b).....                                                                       | 93 |
| Figura 3.71: Potência de entrada na ODN(a) saída da ODN(b) Entrada do decoder (c).....                                                                            | 93 |
| Figura 3.72: Diagrama de olho e BER do canal #1 (a) e do canal 2 (b).....                                                                                         | 96 |



## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                   |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Tabela 1.1: Taxa de transmissão mínima exigida pelos serviços.....                                                | 1 |
|                                                                                                                   | 8 |
| Tabela 2.2: Características dos sistemas baseados no esquema TDM/TDMA.....                                        | 3 |
|                                                                                                                   | 3 |
| Tabela 2.3: Principais características de AWGs comerciais.....                                                    | 5 |
|                                                                                                                   | 0 |
| Tabela 3.4: Parâmetros dos divisores de potência.....                                                             | 5 |
|                                                                                                                   | 6 |
| Tabela 3.5: Principais parâmetros da recomendação ITU-T G.984.1.....                                              | 6 |
|                                                                                                                   | 0 |
| Tabela 3.6: Configuração física e especificação básica da OLT.....                                                | 6 |
|                                                                                                                   | 0 |
| Tabela 3.7: Configuração física e especificação básica da ONT.....                                                | 6 |
|                                                                                                                   | 1 |
| Tabela 3.8: Especificações e características estabelecidas para o desenvolvimento do projeto GPON – Embratel..... | 6 |
|                                                                                                                   | 1 |
| Tabela 3.9: Parâmetros utilizados na avaliação da arquitetura GPON – Embratel.....                                | 6 |
|                                                                                                                   | 2 |
| Tabela 3.10: Resultados dos testes da rede GPON – Embratel.....                                                   | 6 |
|                                                                                                                   | 3 |
| Tabela 3.11: Requisitos para atendimento de usuários.....                                                         | 6 |
|                                                                                                                   | 6 |
| Tabela 3.12: Tabela comparativa de custos: GPON e tecnologias alternativas para a última milha.....               | 6 |
|                                                                                                                   | 7 |
| Tabela 3.13: Principais parâmetros dos componentes usados na simulação WPON.....                                  | 7 |
|                                                                                                                   | 2 |
| Tabela 3.14: Principais parâmetros dos componentes usados na simulação WPON+GPON                                  | 8 |
|                                                                                                                   | 2 |
| Tabela 3.15: Síntese das configurações adotadas nos diversos componentes.....                                     | 9 |
|                                                                                                                   | 1 |
| Tabela 3.16: Síntese dos resultados obtidos nos testes e simulações.....                                          | 9 |
|                                                                                                                   | 5 |

## LISTA DE SIGLAS

|                |                                                         |
|----------------|---------------------------------------------------------|
| <i>ADSL</i>    | <i>Assimetrical Digital subscriber line</i>             |
| <i>APON</i>    | <i>ATM Passive Optical Network</i>                      |
| <i>ASE</i>     | <i>Amplified Spontaneous Emission</i>                   |
| <i>ATM</i>     | <i>Asynchronous Transfer Mode</i>                       |
| <i>APD</i>     | <i>Avalanche Photodiode</i>                             |
| <i>AWG</i>     | <i>Array Waveguide Grating</i>                          |
| <i>BER</i>     | <i>Bit Error Rate</i>                                   |
| <i>BLS</i>     | <i>Broadband Laser Source</i>                           |
| <i>BLD</i>     | <i>Banda Larga Digital</i>                              |
| <i>BPON</i>    | <i>Broadband Passive Optical Network</i>                |
| <i>BW</i>      | <i>Bandwidht</i>                                        |
| <i>BPF</i>     | <i>Band Pass Filter</i>                                 |
| <i>CATV</i>    | <i>Cable Television</i>                                 |
| <i>CAPEX</i>   | <i>Capital Expenditures</i>                             |
| <i>CAD</i>     | <i>Computer Aid Developping</i>                         |
| <i>CDM</i>     | <i>Code Division Multiplexing</i>                       |
| <i>CDMA</i>    | <i>Code Division Multiple Access</i>                    |
| <i>CDR</i>     | <i>Clock Data Recovery</i>                              |
| <i>CONT</i>    | <i>Traffic Container</i>                                |
| <i>CPE</i>     | <i>Customer Premise Equipment</i>                       |
| <i>CPQD</i>    | <i>Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telebras</i> |
| <i>CO</i>      | <i>Central Office</i>                                   |
| <i>C/N</i>     | <i>Relação carrier to noise</i>                         |
| <i>CWDM</i>    | <i>Course Wavelength Division Multiplex</i>             |
| <i>DBA</i>     | <i>Dynamic Bandwidth Assignment</i>                     |
| <i>DOCSIS</i>  | <i>Data Over Cable Service Interface Specification</i>  |
| <i>DGO</i>     | <i>Distribuidor Geral Óptico</i>                        |
| <i>DIO</i>     | <i>Distribuidor Intermediario óptico</i>                |
| <i>DFB</i>     | <i>Distributed Feed Back</i>                            |
| <i>DPSK</i>    | <i>Differential Phase Shift Keyng</i>                   |
| <i>DS-CDMA</i> | <i>Direct Squence-Code Division Multiple Accesss</i>    |
| <i>DSL</i>     | <i>Digital Subscriber Line</i>                          |
| <i>DSLAM</i>   | <i>Digital Subscriber Line Access Multiplex</i>         |
| <i>DTH</i>     | <i>Direct to Home</i>                                   |
| <i>DWDM</i>    | <i>Dense Wavelength Multiplex</i>                       |
| <i>DVD</i>     | <i>Digital Video Decoder</i>                            |

|                         |                                                                     |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>E1</b>               | <i>Hierarquia Europeia 2Mbps</i>                                    |
| <b>EAD</b>              | <i>Ensino à distancia</i>                                           |
| <b>EDFA</b>             | <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>                                 |
| <b>EFM</b>              | <i>Ethernet in the first Mile</i>                                   |
| <b>EFMA</b>             | <i>Ethernet in the first Mile Alliance</i>                          |
| <b>EMI</b>              | <i>Interferências Eletromagnéticas</i>                              |
| <b>ESRI</b>             | <i>Environmental Systems Research Institute</i>                     |
| <b>EPON</b>             | <i>Ethernet Passive Optical Network</i>                             |
| <b>FBG</b>              | <i>Fiber Bragg Grating</i>                                          |
| <b>FBT</b>              | <i>Fused Biconic Technology</i>                                     |
| <b>FDMA</b>             | <i>Frequency Division Multiple Access</i>                           |
| <b>FETH</b>             | <i>Fast Ethernet</i>                                                |
| <b>FEC</b>              | <i>Forward Error Correct</i>                                        |
| <b>FE-OCDMA</b>         | <i>Frequency Encoding-Optical Code Division Multiple Access</i>     |
| <b>FFH-OCDMA</b>        | <i>Fast Frequency Hopping-Optical Code Division Multiple Access</i> |
| <b>FHMA</b>             | <i>Frequency Hoping Multiple Access</i>                             |
| <b>FSO</b>              | <i>Free Space Optical</i>                                           |
| <b>FSAN</b>             | <i>Full Service Access Network</i>                                  |
| <b>FTP</b>              | <i>File Transfer Protocol</i>                                       |
| <b>FTTB</b>             | <i>Fiber To The Building</i>                                        |
| <b>FTTC</b>             | <i>Fiber To The Curb</i>                                            |
| <b>FTTCa</b>            | <i>Fiber To The Cabinet</i>                                         |
| <b>FTTE<sub>x</sub></b> | <i>Fiber To The Exchange</i>                                        |
| <b>FTTH</b>             | <i>Fiber To The Home</i>                                            |
| <b>FTTN</b>             | <i>Fiber To The Neighborhood</i>                                    |
| <b>FTTP</b>             | <i>Fiber To The POP</i>                                             |
| <b>FTTX</b>             | <i>Fiber to the “ X ”</i>                                           |
| <b>GETH</b>             | <i>Giga Ethernet</i>                                                |
| <b>GEM</b>              | <i>GPON Encapsulation Method</i>                                    |
| <b>GPON</b>             | <i>Giga Ethernet Passive Optical Network</i>                        |
| <b>GVD</b>              | <i>Group Velocity Dispersion</i>                                    |
| <b>GUI</b>              | <i>Graphical User Interface</i>                                     |
| <b>HDTV</b>             | <i>High Definition Television</i>                                   |
| <b>HFC</b>              | <i>Hybrid Fiber Coax</i>                                            |
| <b>HSI</b>              | <i>High Speed Interface</i>                                         |
| <b>IEEE</b>             | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>            |
| <b>IPTV</b>             | <i>Internet Protocol Television</i>                                 |
| <b>IP/MPLS</b>          | <i>Internet Protocol-Multi Protocol Switching</i>                   |
| <b>ITU-T</b>            | <i>International Telegraph Union - Telecomunications</i>            |
| <b>JPEG</b>             | <i>Joint Picture Expertise Group</i>                                |
| <b>LAG</b>              | <i>Link Aggregation</i>                                             |
| <b>LN-PM</b>            | <i>Lithium Niobate Phase Modulation</i>                             |
| <b>LPF</b>              | <i>Low Pass Filter</i>                                              |
| <b>L2L</b>              | <i>Lan to Lan</i>                                                   |
| <b>MAI</b>              | <i>Multiple Access Interference</i>                                 |
| <b>MLLD</b>             | <i>Mode Locked Laser Diode</i>                                      |
| <b>MMF</b>              | <i>Multimode Fiber</i>                                              |
| <b>MPEG</b>             | <i>Moving Picture Experts Group</i>                                 |
| <b>MPLS</b>             | <i>Multi Protocol Label Switch</i>                                  |

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| NGN    | <i>New Generation Network</i>                           |
| NGPON  | <i>New Generation Passive Optical Network</i>           |
| NRZ    | <i>Não Retorno a Zero</i>                               |
| NT     | <i>Network Terminal</i>                                 |
| NTSC   | <i>National Television System Committee</i>             |
| OAM    | <i>Operations, Administration and Maintenance</i>       |
| OCDMA  | <i>Optical Code Division Multiple Access</i>            |
| ODN    | <i>Optical Distribution Network</i>                     |
| OLT    | <i>Optical Line Terminal</i>                            |
| ONT    | <i>Optical Network Terminal</i>                         |
| OOK    | <i>On Off Keying</i>                                    |
| OOC    | <i>On off code</i>                                      |
| OPEX   | <i>Operational Expenditures</i>                         |
| ONU    | <i>Optical Network unit</i>                             |
| OTN    | <i>Optical Transport Network</i>                        |
| OSA    | <i>Optical Spectrum Analyser</i>                        |
| OSI    | <i>Open System Interconnection</i>                      |
| PABX   | <i>Private Automatic Branch Exchange</i>                |
| PCM    | <i>Pulse Code Modulation</i>                            |
| PDH    | <i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>                 |
| PMD    | <i>Polarization Mode Dispersion</i>                     |
| PLC    | <i>Planar Lightwave Circuit</i>                         |
| PON    | <i>Passive Optical Network</i>                          |
| POP    | <i>Point of Presence</i>                                |
| POTS   | <i>Public Old Telephone System</i>                      |
| PPC    | <i>Ponto de Presença Cliente</i>                        |
| PRBS   | <i>Pseudo Random Binary Sequency</i>                    |
| PSTN   | <i>Public Switch Telephone Network</i>                  |
| PSDN   | <i>Public Switch Data Network</i>                       |
| QoS    | <i>Quality of Service</i>                               |
| RF     | <i>Radio Frequency</i>                                  |
| RIN    | <i>Relative Intensity Noise</i>                         |
| RNP    | <i>Rede Nacional de Pesquisa</i>                        |
| RPT    | <i>Remote Protocol Termination</i>                      |
| RSTP   | <i>Rapid Spanning Tree</i>                              |
| RSOA   | <i>Reflective Semiconductor Optical Amplifier</i>       |
| RTD    | <i>Round Trip Delay</i>                                 |
| SAC    | <i>Spectral Amplitude Coding</i>                        |
| SAGRE  | <i>Sistema Automatizado de Gerencia de Rede Externa</i> |
| SBS    | <i>Sliced Broadband Sources</i>                         |
| SDH    | <i>Synchronous Digital Hierarchy</i>                    |
| SDH-NG | <i>Synchronous Digital Hierarchy- New Generation</i>    |
| SDTV   | <i>Standard Definition Television</i>                   |
| SFP    | <i>Small Form Factor Pluggable Transceiver</i>          |
| SHDSL  | <i>Single Pair High Digital Subscriber Line</i>         |
| SIR    | <i>Signal to Interference ratio</i>                     |
| SLA    | <i>Service Level Agreement</i>                          |
| SLM    | <i>Spatial Light Modulator</i>                          |
| SMF    | <i>Single Mode Fiber</i>                                |

|               |                                                           |
|---------------|-----------------------------------------------------------|
| <i>SMPTE</i>  | <i>Society of Motion Picture and Television Engineers</i> |
| <i>SNI</i>    | <i>Service Node Interface</i>                             |
| <i>SNR</i>    | <i>Signal to noiseratio</i>                               |
| <i>SPC</i>    | <i>Spectral Phase Coding</i>                              |
| <i>SSE</i>    | <i>Self Espontaneous Emission</i>                         |
| <i>STM</i>    | <i>Sincronous Transfer Mode</i>                           |
| <i>SOHO</i>   | <i>Small Off Home Office</i>                              |
| <i>SOA</i>    | <i>Spontaneous Optical Amplifier</i>                      |
| <i>T-CONT</i> | <i>Transmission Container</i>                             |
| <i>TDM</i>    | <i>Time Domain Multiplex</i>                              |
| <i>TDMA</i>   | <i>Time Domain Multiple Access</i>                        |
| <i>TI</i>     | <i>Tecnologia da informação</i>                           |
| <i>TS</i>     | <i>Time Spreading</i>                                     |
| <i>UMG</i>    | <i>Universal Media Gateway</i>                            |
| <i>UIT</i>    | <i>Union International Telecommunication</i>              |
| <i>UNI</i>    | <i>User Network Interface</i>                             |
| <i>VoIP</i>   | <i>Voice over Internet Protocol</i>                       |
| <i>VDSL</i>   | <i>Very High Bit RateDigital Subscriber Line</i>          |
| <i>VSAT</i>   | <i>Very Small Aperture Terminal</i>                       |
| <i>WAN</i>    | <i>Wide Area Network</i>                                  |
| <i>WDM</i>    | <i>Wavelength Division Multiplexing</i>                   |
| <i>WDMA</i>   | <i>Wavelength Division Multiple Access</i>                |
| <i>WIMAX</i>  | <i>World Interoperability</i>                             |
| <i>WH</i>     | <i>Wavelength Hopping</i>                                 |
| <i>WPON</i>   | <i>WavelengthPassive Optical Network</i>                  |
| <i>W/T</i>    | <i>Wavelength/time</i>                                    |
| <i>XDSL</i>   | <i>Variations of Digital Subscriber line</i>              |

## **RESUMO**

O explosivo crescimento da Internet acarretou aumento na demanda por aplicações e serviços em banda larga. As redes ópticas passivas (PON) e tecnologia FTTX, têm despertado grande atenção da indústria e comunidade científica, por seu enorme potencial em reduzir o gargalo de banda em redes de acesso, aliado ao baixo custo. Este trabalho tem como objetivo a investigação de três soluções no domínio óptico para a transmissão na última milha de sinais multimídia de banda larga: GPON, WDM-PON (WPON) e OCDMA-PON. O estudo está dividido em duas partes principais. Primeiramente, a topologia GPON é discutida, e testes experimentais do projeto GPON – Embratel são cuidadosamente apresentados, incluindo uma análise comparativa dos custos da solução GPON com as demais tecnologias competidoras. Em seguida, as topologias WPON e OCDMA-PON são investigadas através de simulações numéricas realizadas em uma versão de demonstração do software OptiSystem. Ao final dessas análises, os principais parâmetros de desempenho e características das redes avaliadas, serão registrados e sintetizadas de forma a prover um ambiente adequado para a tomada de decisões relacionadas à aplicabilidade de cada rede associadas aos requisitos do projeto, tanto do ponto de vista técnico quanto do financeiro, considerando o mercado residencial e SOHO.

Palavras-chave: Rede Óptica Passiva; GPON; WDM-PON; OCDMA-PON

## **ABSTRACT**

The explosive growth of the Internet has led to increased demand for broadband applications, and services. Passive optical networks (PON) have attracted both the industry's and the scientific community's interest, for its enormous potential to reduce the bandwidth bottleneck in access networks, in addition to its low cost. This dissertation aims at investigating three optical domain solutions for the last mile transmission of broadband multimedia signals: GPON, WDM-PON (WPON), and OCDMA-PON. The investigation is divided into two major parts. First, the GPON topology is discussed, and experimental tests of Embratel's GPON project are carefully described. A comparative cost analysis of the GPON solution and of competing technologies is also presented. Second, the WPON, and OCDMA-PON topologies are investigated through numerical simulations on a demo version of the OptiSystem software. The results indicate that these solutions are feasible, from both technical and financial points of view, considering the residential as well as the SOHO market.

**Keywords:** Passive Optical Network; GPON; WDM-PON; OCDMA-PON

## 1. INTRODUÇÃO

Nos anos 90, o explosivo crescimento da Internet acarretou o aumento da demanda por aplicações e serviços de banda larga e alterou os padrões de tráfego, que adquiriu uma natureza imprevisível e em rajadas, mudando, assim, as características das então estabelecidas redes de comunicação. Em adição ao tradicional serviço de voz, destacam-se as novas aplicações *media-rich*, tais como: vídeo sob demanda (VoD), videoconferência, transferência de imagens de alta resolução, jogos online multiusuário, ensino a distância, para citar algumas.

O conceito de computação em nuvem (*cloud computing*), por exemplo, permite que a memória e capacidades de armazenamento e cálculo de computadores e servidores sejam compartilhadas pela Internet. Os serviços podem ser acessados de qualquer lugar, a qualquer hora, não havendo necessidade de instalação de programas, e criando, assim, um ambiente mais flexível.

Nos próximos anos, o Brasil sediará vários eventos esportivos que demandarão uma enorme capacidade de transmissão e aplicações de transmissão de imagens. Em julho de 2011 ocorreu a transmissão da Olimpíada Militar, seguida pelo evento Rio+20. Em 2013, ocorrerá a Copa das Confederações, o Rock in Rio, e o evento religioso “Encontro da Juventude”; em 2014, a Copa do Mundo; e, em 2016, os Jogos Olímpicos, todos envolvendo um público numeroso. Esses eventos certamente exigirão a utilização de novas tecnologias, que demandarão uma substancial ampliação da planta de telecomunicações, a exemplo do que ocorreu anteriormente em outros países anfitriões.

De acordo com a fabricante de equipamentos de rede Cisco System, [Medeiros, 2012], o tráfego IP deve crescer quase 30% até 2016, principalmente devido à forte demanda por transmissão de imagem, especialmente vídeo de alta resolução, e ao crescimento do uso de dispositivos como *smartphones*, *tablets* e *chips* de monitoramento, para a medição do consumo de energia. Ainda segundo a Cisco, o segmento de vídeo responderá por 54% de todo o consumo de tráfego global na Internet em 2016.

Recentemente, uma parceria da PUC-Rio com UNIRIO e UFSM permitiu o desenvolvimento do primeiro protótipo de um sistema de *Video-Based Interactive Storytelling*, onde o espectador é capaz de interagir via controle remoto, celular, voz ou gestos e modificar o curso dos filmes [LUCENA, 2011]. Em novembro de 2011, uma aplicação desse protótipo



usando o *middleware* (software de apoio e/ou complemento) denominado Ginga, desenvolvido para o sistema Nipo-Brasileiro de TV digital, recebeu menção honrosa em inovação pela ITU na competição “ITU IPTV *Application Challenge*”. [APPROACH, 2012]

Outro, a empresa Netflix já permite que os filmes e as séries de TV sejam assistidos instantaneamente pela Internet a preços bastante atrativos, conforme anunciado em seu site.

Neste cenário, a redução do chamado “gargalo” da última milha requer um aumento significativo da capacidade das redes de acesso, que estabelecem conectividade entre provedores de serviço e usuários residenciais ou corporativos. De uma forma mais simples, é a última ligação (ou a primeira), em uma rede, entre as imediações do cliente e o primeiro ponto de conexão com a infraestrutura da rede – ponto de presença (PoP – *point of presence*) ou central (CO – *Central Office*). Cabe ressaltar que a capacidade das redes de transporte das operadoras, ou seja, aquelas que interligam suas estações backone(CO), às suas estações PoP, operam com altas taxas de transmissão, graças à utilização das redes ópticas de alta capacidade, da ordem de 100 Gb/s.

Nos dias de hoje, as redes de acesso em banda larga instaladas são predominantemente baseadas na tecnologia DSL (*Digital Subscriber Line*) e na solução híbrida fibra-cabo coaxial (HFC – *Hybrid Fiber-Coax*), esta usada pelas operadoras de TV a cabo ou CATV instaladas [KRAMER, 2002]. Ambas as tecnologias já migraram seus sistemas da tecnologia analógica para a digital, o que lhes conferiu, além da melhor qualidade da imagem, a possibilidade de disponibilizar novas aplicações, agregando mais valor aos seus serviços. Por exemplo, a tecnologia ADSL (*Asymmetrical DSL*) é capaz de prover taxas que variam de 1,5 a 8 Mb/s da central para o usuário doravante denominada direção descendente e, na direção contrária, doravante denominada direção ascendente, entre 16 e 640 Kb/s. A distância entre a central (doravante também chamada de operadora) e o assinante DSL está limitada a 5,5 km, devido às elevadas perdas nos ruidosos cabos metálicos. O emergente padrão VDSL (*Very-high-bit-rate DSL*) já suporta taxa de 50 Mb/s, descendente, porém com limitações de distância bem mais severas, de até 500 m. Por sua vez, redes CATV oferecem serviços Internet através de canais RF dedicados, utilizando cabos coaxiais, também com perdas elevadas, e inadequados para o modelo bidirecional das redes de dados. O padrão DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) regulamenta as redes CATV que oferecem serviços de Internet.

É bem verdade que a rede de acesso em banda larga é, de fato, um sucesso. No final de 2005 já existiam em torno de 210 milhões de assinantes em todo o mundo, e o tráfego de internet

deve crescer quase 30% até 2016 [MEDEIROS,2012]. Nos últimos anos, a largura de banda oferecida pela tecnologia DSL cresceu bastante, variando tipicamente entre 512 Kb/s e 20 Mb/s (ADSL2+). Portanto, não há dúvidas de que o crescimento da tecnologia ADSL ajudou a educar e impulsionar o mercado global para aplicações em tempo real. O cliente residencial, sempre interessado em novos aplicativos e em serviços de vídeo, requer mais e mais largura de banda e tem a expectativa de que o desempenho de sua rede ‘caseira’ seja semelhante ao de uma LAN corporativa tipicamente em 100 Mb/s.

A Tabela 1.1 sumariza a taxa de transmissão mínima requerida por alguns serviços, considerando o mercado residencial, incluindo o atendimento à demanda atual de escritórios residenciais conhecidos como SOHO (*Small Office Home*).

Tabela 1.1: Taxa de transmissão mínima exigida pelos serviços

| Serviços                                                       | Taxa Mínima    |
|----------------------------------------------------------------|----------------|
| Sistemas de sensoriamento remoto e tele-controle               | 1 a 10 Kb/s    |
| Voz sobre IP (VoIP – G 723 )                                   | 15 Kb/s        |
| E-mail                                                         | 30 Kb/s        |
| Serviços virtuais on line (compras, jornais, bibliotecas etc.) | 50 a 100 Kb/s  |
| Serviços de localização pela Web                               | 50 a 100 Kb/s  |
| Transferência eletrônica de arquivos (FTP)                     | 50 a 100 Kb/s  |
| Videofone                                                      | 120 Kb/s       |
| Streaming de áudio estéreo em alta fidelidade                  | 128 a 362 Kb/s |
| Voz sobre IP (VoIP – G 711 )                                   | 100 Kb/s       |
| IPTV                                                           | 120 a 300 Kb/s |
| Multimídia Web Browsing                                        | 300 a 400 Kb/s |
| Vídeo conferência                                              | 400 a 800 Kb/s |
| Games on line                                                  | 600 a 800 Kb/s |
| Armazenamento de vídeo comprimido em servidor                  | 1 a 2 Mb/s     |
| TV via Satélite – DTH                                          | 2 a 4 Mb/s     |
| TV Digital Standard Definition / CATV                          | 4 a 8 Mb/s     |
| Transmissão de vídeo de contribuição para emissoras            | 8 a 30 Mb/s    |
| Serviço de Telepresença                                        | 10 a 30 Mb/s   |
| TV Digital em alta definição                                   | 20 a 45 Mb/s   |
|                                                                |                |

Fonte: ANATEL, 2011

Um primeiro olhar revela que cada uma das aplicações, individualmente, não requer banda superior a 20 Mb/s (teoricamente, a taxa oferecida por ADSL2+), exceto as de imagem e vídeo. Então, o desafio consiste em oferecer, simultaneamente, os diferentes serviços,

incluindo o sinal de vídeo em HDTV (*High Definition Television*), o qual, de acordo com as recomendações SMPTE 292M 1080i/50Hz [STANDARD SMPTE], requer uma taxa de 1,5 Gbp/s para a transmissão de um sinal de vídeo com largura de banda de 6 MHz, enquanto um sinal de música em alta fidelidade, estéreo, necessita de  $2 \times 128$  Kb/s, apenas, cada qual com uma banda de 10 kHz.

Atualmente, existem técnicas para a compressão do sinal, reduzindo, assim, a taxa de transmissão e, em consequência, a largura de banda. O padrão JPEG (*Joint Picture Experts Group*), baseado nas recomendações ITU-TT. 800, é usado especificamente para compressão de imagens estáticas, possibilitando armazenar um número maior de imagens nos dispositivos de memória. O padrão MPEG (*Moving Picture Experts Group*), documentado na recomendação ITU-T H.262, permite a compressão de imagens em movimento, em última análise sinais de vídeo, e vem sendo aperfeiçoado ao longo do tempo, sempre com o objetivo de reduzir a largura de banda de transmissão, gerando um mínimo de degradação em relação à qualidade, precisão e à integridade da informação [ITU-Te, 2002].

O padrão denominado JPEG 2000, definido nas recomendações ITU-T T.800, opera com uma taxa média de compressão de 10:1, o que acarreta uma taxa de transmissão para sinais SDTV (*Standard Definition Television*) em torno de 25 Mb/s e para sinais HD na faixa de 150 Mb/s. Esse padrão apresenta como principal vantagem em relação ao MPEG a redução da latência do sinal (atrasos impostos pela rede e pelos equipamentos de comunicação), característica que poderá comprometer determinadas aplicações sensíveis a retardos [ITU-T(i), 2002].

As técnicas de compressão anteriormente descritas têm grande influência na qualidade do serviço (QoS) a ser prestado. O estado da arte em termos de compressão de alta definição é o MPEG-4, definido nas recomendações ITU-T H.264. Nessa modalidade de compressão, ao invés da compressão dos elementos de imagem provenientes da digitalização como era feito nas técnicas anteriores (MPEG-1 e MPEG-2), o processo de compressão atua diretamente sobre os objetos da imagem, onde cada um deles é decomposto em um conjunto de objetos conhecidos e pré-mapeados, de forma a requerer uma menor quantidade de informação ou, especificamente, uma menor taxa de transmissão por quadro processado [ITU-T(j), 2002].

Ainda que as técnicas de compressão como MPEG-4 sejam implementadas (6 a 8 Mb/s por canal HD em 2007-2008, contra 1-3 Mb/s por canal SDTV), dois ou três canais HDTV, se oferecidos simultaneamente, requisitam mais banda do que a tecnologia ADSL2+ é capaz de

prover. Além disso, outros serviços, como o VoD, o VoIP, os jogos online e a proliferação de equipamentos multimídia (câmeras digitais, Webcam, MP3) geram significativo tráfego ascendente, causando impacto nas correspondentes taxas de transmissão. Clientes corporativos de pequeno porte têm demandas de banda semelhantes, variando apenas a composição dos serviços.

De acordo com [Green, 2004], já naquele período havia um déficit de largura de banda de cerca de três ordens de grandeza entre as redes metropolitana e local, utilizando as tecnologias mencionadas. Com base no exposto, pode-se prever que em um futuro próximo, os provedores de serviço deverão disponibilizar larguras de banda da ordem de 100 Mb/s (descendente) e 50 Mb/s (ascendente) por assinante, de maneira a alcançar requisitos de qualidade de serviço (QoS) exigido pelo mercado.

Segundo avaliação da Cisco, divulgada no evento “*Brazil Summit Cisco Seminar 2010*”, o tráfego de vídeo tanto nas redes de transporte quanto nas redes de acesso, sofrerá um crescimento exponencial no momento da adoção da tecnologia vídeo sobre IP, a exemplo do que ocorreu com o VoIP (Voz sobre IP), uma vez que o tráfego de vídeo poderá compartilhar a mesma infraestrutura dos outros serviços de voz e dados nas redes IP multiserviço.

Nesse cenário, outras tecnologias de acesso em banda larga, com ou sem fio (*wireline* ou *wireless*), vêm sendo propostas e investigadas. Essas soluções apresentam características bastante distintas, que devem ser levadas em consideração dependendo do tipo da aplicação desejada, e são descritas na seção seguinte.

## 1.1 SOLUÇÕES PARA A REDE DE ACESSO

Dentre as soluções *wireless*, destacam-se os sistemas WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) segundo Andrews et al.[2007], idealmente capazes de prover conectividade de até 124 Mb/s por distâncias em torno de 70 km, também de acordo com a recomendação IEEE 802.16. Entretanto, em termos da efetiva implementação, a maioria das operadoras opta pela versão IEEE 802.16e, que recomenda uma taxa menor, de 15 Mb/s, para uma distância máxima de 5 km. Algumas ainda utilizam valores ainda mais conservadores, como é o caso das operadoras no território brasileiro, que utilizam a faixa de frequência de 3,5 GHz, já congestionada, e por conseguinte operando com taxa máxima de 2 Mb/s para uma

distância máxima de 2,5 km, desta forma, oferecendo serviços limitados de telefonia e Internet banda larga.

Há alternativas que envolvem os enlaces ópticos no espaço livre (FSO – *Free Space Optics*), os quais, conforme descrito por [HARBOE, 2004], são de fácil instalação e relativo baixo custo. A tecnologia FSO está descrita nas recomendações ITU-T G.640 a 649649. [ITU-Ta].

Por sua vez, a solução *wireline* consiste na utilização de cabos, metálicos e/ou ópticos, aéreos ou enterrados. Como discutido anteriormente, a solução via cabo metálico, coaxial ou de pares, embora tradicional e em constante aprimoramento, apresenta limitações bastante severas de taxa de transmissão e distância. Em particular, as redes metálicas em operação no território brasileiro apresentam uma alta taxa de falhas decorrentes do furto de cabos, de descargas atmosféricas e por emendas e conexões mal feitas.

Uma promissora solução são as redes de acesso óptico, que utilizam a fibra óptica no acesso à última milha. Essas redes são classificadas em ponto-a-ponto (P2P – *Point to Point*) ou ponto-multiponto (P2MP – *Point to Multipoint*), de acordo com a distribuição de cabos ópticos. Na arquitetura P2MP, um conjunto de usuários compartilha uma fibra óptica até um nó remoto (RN), a partir do qual cada assinante dispõe de seu próprio enlace (óptico ou metálico). O RN pode ter característica ativa ou passiva, dependendo se há ou não alimentação elétrica, e as correspondentes redes são denominadas rede óptica ativa (AON – *Active Optical Network*) e rede óptica passiva (PON – *Passive Optical Network*).

Em particular, as redes PON têm despertado grande atenção da indústria e comunidade científica, por seu enorme potencial em reduzir o “gargalo” de banda na última milha, aliado ao baixo custo de instalação, manutenção e facilidade de *upgrade* [TAKEUTI, 2005]. Outro fator importante é que, nas tecnologias competidoras que usam os cabos metálicos, a largura de banda oferecida decresce com o aumento da distância, limitação que não ocorre com as PON’s, uma vez que não há dispositivos ativos entre a central e o assinante, apenas os componentes passivos são utilizados para a transmissão do sinal. Dessa forma, não há necessidade de se utilizar esquemas de alimentação elétrica e gerenciamento nos cabos, o que acelera a introdução de novos serviços e reduz custos de um modo geral.

A primeira geração de redes ópticas passivas (FG PON – *First Generation PON*), denominada TDM-PON (ou simplesmente PON) é do tipo P2MP e usa protocolo de controle de acesso ao meio (MAC – *Media Access Control*) baseado em múltiplo acesso por divisão de

tempo (TDMA – *Time-Division Multiple Access*). Essa configuração resulta em uso ineficiente da largura de banda disponível, pois intervalos de tempo ociosos não são utilizados por outro assinante. A topologia em árvore, predominantemente usada nessas redes, não contempla, ainda, importantes características de restauração e proteção. [GONÇALVES, 2008].

Desde meados dos anos 2000, melhorias na tecnologia PON vêm sendo consideradas por duas organizações: o IEEE e o grupo FSAN (*Full Service Access Network*). Em 2009, o padrão 10G-PON (ou XG-PON), que suporta configurações simétrica (10 Gbp/s) e assimétrica (10 Gbp/s / 1 Gbp/s), foi ratificado como IEEE 802.3av. Uma recente publicação científica mostrou a compatibilidade dessa tecnologia com o padrão GPON [ZHU, 2012].

Em contraste, o grupo FSAN considera a solução referida como WDM-PON (ou WPON), com múltiplo acesso por divisão em comprimento de onda (WDMA – *Wavelength Division Multiple Access*). Cada assinante tem um comprimento de onda dedicado a ele e, neste sentido, uma rede WPON é do tipo P2P, o que facilita o controle de acesso ao meio. Por outro lado, o custo de instalação/operação é elevado, associado, principalmente, aos equipamentos WDM que operam com lasers sintonizados. [SILVA, 2010].

Mais recentemente, a solução OCDMA-PON, baseada em múltiplo acesso óptico por divisão de código (OCDMA – *Optical Code-Division Multiple Access*), vem sendo proposta na literatura com uma alternativa às soluções TDMA e WDMA. Essas redes têm topologia virtual P2P, escalabilidade e elevada capacidade de inserção de novos usuários [SANTOS, 2006; FRIGYES, 2006; SANCHES, 2010].

## 1.2 OBJETIVO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo a investigação de três soluções no domínio óptico para a transmissão na última milha de sinais multimídia de banda larga: GPON, WDM-PON (WPON) e OCDMA-PON. As topologias propostas são apresentadas e comparadas através de um estudo de casos, que contempla a descrição de testes experimentais do projeto GPON – Embratel, e de simulações numéricas realizadas em uma versão de demonstração do software OptiSystem. Ainda é apresentada uma análise de custos de investimento e operação. Os resultados indicam que as soluções são viáveis, tanto do ponto de vista técnico quanto do financeiro, considerando o mercado residencial e SOHO.

O restante do trabalho está organizado da seguinte maneira: no Capítulo 2 é apresentada uma descrição detalhada de uma rede PON e suas variantes, incluindo as principais características da rede, sua arquitetura básica e seus componentes. Os padrões BPON, EPON e GPON são, ainda, brevemente comparados. No Capítulo 3, a topologia GPON é discutida no âmbito de um projeto real, desenvolvido pela Embratel para utilização na substituição de parte da rede metálica do Estado do Rio de Janeiro. Os principais resultados dos testes de campo são apresentados e comentados. As soluções WPON e OCDMA-PON são investigadas através de simulações numéricas realizadas em uma versão de demonstração do software OptiSystem. O Capítulo 4 apresenta as principais conclusões do trabalho.

## 2. REDE ÓPTICA PASSIVA: CONCEITOS E ARQUITETURAS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos fundamentais de uma rede óptica passiva (PON) e está organizado da seguinte forma: a Seção 2.1 descreve a arquitetura básica de uma rede PON, incluindo o conceito de FTTx; a Seção 2.2 apresenta a técnica de multiplexação e múltiplo acesso ao meio por divisão de tempo (TDM/TDMA), incluindo uma breve descrição dos padrões associados. As Seções 2.3 e 2.4 apresentam, respectivamente, as técnicas de multiplexação e múltiplo acesso ao meio por divisão de comprimento de onda (WDM/WDMA) e código (CDM/OCDMA). A Seção 2.5 mostra duas configurações de redes híbridas – WPON/GPON e WPON/OCDMA-PON – e relata testes experimentais descritos na literatura. Para finalizar, na Seção 2.6, são descritos os principais componentes de uma rede PON.

### 2.1 ARQUITETURA BÁSICA DE REDES PON

Uma rede óptica passiva (PON) estabelece a conexão entre uma central (CO) ou ponto de presença (PoP) e um conjunto de usuários (assinantes). Esta conexão é usualmente denominada última milha (ou primeira milha) e representa o “gargalo” de velocidade para os serviços que se deseja oferecer para os usuários. A central pode estar localizada, por exemplo, em um anel metropolitano. Exemplos de equipamentos na central incluem *switchs* de voz (PSTN/NGN), *switchs* ATM/Frame Relay/X-25, *switchs* Ethernet e roteadores IP/MPLS. Para distinguir as direções de fluxo de tráfego, o termo descendente ou descida (descendente) se refere às transmissões da central para os assinantes e o termo ascendente ou subida (ascendente), ao fluxo na direção contrária. Duas topologias de rede são possíveis: anel ou



estrela. A topologia em anel reduz o custo de implantação, porém é mais vulnerável a falhas, causando a interrupção da rede.

O esquema representado pela Figura 2.1 ilustra a topologia estrela, mais típica, e que caracteriza uma rede ponto-multiponto (P2MP). Os sinais ópticos são transmitidos e controlados por equipamentos ativos, tanto do lado da operadora quanto do lado do usuário. A distribuição dos sinais é feita utilizando apenas divisores passivos de potência ao longo da rede, portanto, não há elementos ativos na planta externa.

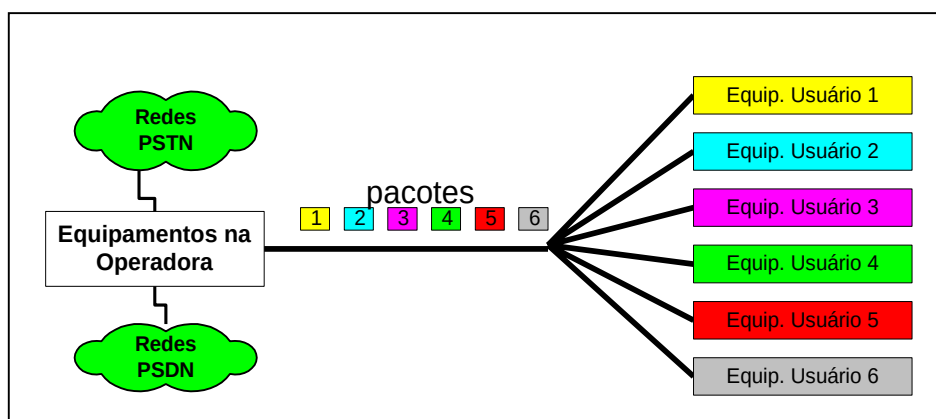


Figura 2.1: Ilustração esquemática de uma rede PON.

Existem diversas maneiras de realizar uma rede PON. A aplicação da tecnologia PON para prover conectividade em banda larga na rede de acesso é comumente chamada FTTx (*Fiber-To-The x*). A letra “x” indica a aproximação / penetração da fibra óptica na rede de acesso. As principais variações são destacadas a seguir:

a) FTTH (*Fiber-To-The Home*): a fibra óptica se estende da estação da operadora, ou de algum de seus pontos de presença (PoPs), até uma interface óptica do equipamento do cliente, residencial ou corporativo, que esteja em suas próprias instalações.

b) FTTB (*Fiber-To-The Business ou Building*): a fibra óptica se estende da estação da operadora, ou de algum de seus PoPs, até o distribuidor óptico localizado na empresa do cliente ou em um edifício de concepção moderna. Nesse caso, a interligação com o usuário final é feita através de outro segmento de fibra, chamado de rabicho, ou pela conversão óptica-elétrica, visando distribuir o sinal em um cabo metálico, tipicamente utilizando a tecnologia xDSL.

c) FTTC (*Fiber-To-The Curb*): a fibra óptica se estende da estação da operadora, ou de algum de seus PoPs, até uma caixa de emenda ou derivação localizada em postes, para vias aéreas, ou interna, em galerias subterrâneas. Novamente, as duas opções descritas na

modalidade anterior podem ser empregadas: ligar as unidades do usuário através de rabichos ópticos, ou instalar nas dependências do cliente um armário que contenha a unidade conversora, estendendo a rede de cobre ou cabo coaxial até o ponto de conexão dos CPEs (*Customer Premise Equipment*).

d) FTTN (*Fiber-To-The Neighborhood* ou *Node*): caso estendido do FTTC. A distância do PoP à caixa de emenda ou armário é maior, mas não deve superar 3 km, considerando cabos de cobre ou coaxiais. Essa modalidade é também referida como FTTCa (*Fiber-To-The Cabinet*).

e) FTTEx (*Fiber-To-The Exchange*): a fibra óptica se estende da estação da operadora, ou de algum de seus PoPs, até a Central Telefônica.

O termo geral e mais popular é FTTP (*Fiber-To-The Premise*), que inclui os importantes conceitos FTTH e FTTB, capazes de prover serviço integrado de voz, dados e vídeo aos clientes. De outro ponto de vista, redes FTTP permitem, também, que provedores de serviço diversifiquem suas atividades, que se estendem da comunicação ao entretenimento e informação, e aumentem seu faturamento.

A Figura 2.2 ilustra as diversas configurações mencionadas anteriormente. Cabe ressaltar que a classificação FTTx não define os equipamentos eletrônicos e sistemas utilizados no enlace.

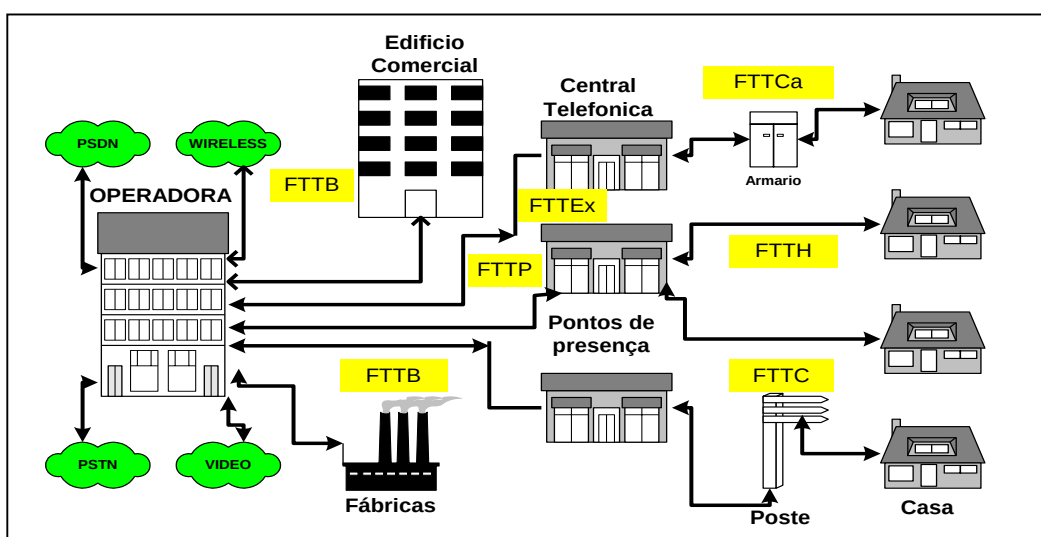


Figura 2.2: Cenário de configurações de redes FTTx

De acordo com [PINHEIRO], em seu artigo “Redes Ópticas de Alto Desempenho”, o mercado tem se referido à penetração em geral das fibras ópticas nas redes de acesso como FTTx. Isso tem criado certa confusão, uma vez que FTTx engloba uma série de arquiteturas e protocolos. De fato, algumas das redes utilizando tecnologia DSL ou redes híbridas fibra-coaxial (HFC) podem se qualificar como FTTx porque utilizam fibras ópticas no acesso, como é feito numa rede óptica totalmente passiva (PON).

De forma a aproveitar a ampla largura de banda oferecida pela fibra óptica, três principais técnicas de multiplexação de sinais e acesso ao meio são empregadas em redes PON: multiplexação e múltiplo acesso por divisão de tempo (TDM/TDMA); multiplexação e múltiplo acesso por divisão de comprimento de onda (WDM/WDMA); multiplexação e múltiplo acesso óptico por divisão de código (CDM/OCDMA). O múltiplo acesso compreende o compartilhamento do meio de transmissão em um dado domínio por vários usuários.

O restante do Capítulo 2 é dedicado à descrição das correspondentes arquiteturas de rede PON. As vantagens e desvantagens de cada solução são apontadas, de forma a fornecer subsídios que auxiliem as operadoras na decisão de migração de suas redes e serviços e, também, no entendimento dos resultados apresentados no Capítulo 3. Na Seção 2.2, a arquitetura TDM-PON e os correspondentes padrões BPON (*BroadBand PON*), EPON (*Ethernet PON*) e GPON (*Gigabit PON*) são apresentados. Nas Seções 2.3 e 2.4, as arquiteturas WDM-PON e OCDMA-PON são, respectivamente, descritas.

## 2.2 REDES TDM-PON

Como comentado no Capítulo 1, a maior parte de redes PON instaladas em todo o mundo é do tipo ponto-multiponto (P2MP), com topologia estrela, então denominadas TDM-PON.

A arquitetura básica de uma rede TDM-PON é mostrada na Figura 2.3.

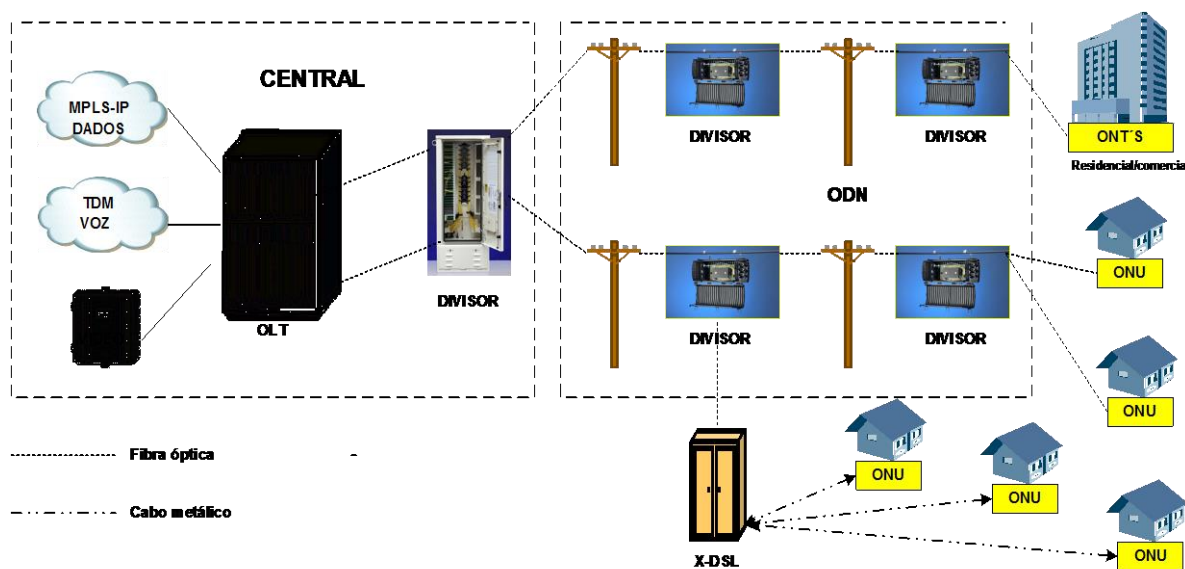


Figura 2.3: Arquitetura básica de uma rede PON

A rede inclui módulos ativos, que consistem em um terminal de linha óptico (OLT – *Optical Line Terminal*) e em terminais de rede ópticos (ONT – *Optical Network Terminal*), localizados, respectivamente, na central e nas imediações do usuário. O termo unidade de rede óptica (ONU – *Optical Network Unit*), cunhado pelo IEEE, é também encontrado na literatura. Esses módulos possuem um par transmissor/receptor, onde são realizadas as conversões eletro-ópticas, e promovem a interface com as redes de serviços das operadoras e com os equipamentos dos usuários (CPE – *Customer Premise Equipment*) dos usuários.

A planta externa, chamada de rede de distribuição (ODN – *Optical Distribution Network*), conecta a OLT aos diversos ONT's. Ela é composta exclusivamente de fibras ópticas e divisores de potência que são compartilhados pelos usuários e tem, portanto, característica totalmente passiva. Um aspecto muito importante na ODN diz respeito ao posicionamento e razão de divisão (1:N) dos divisores de potência, como observado na Figura 2.4. O número de rotas de distribuição pode variar de 2 a 64, mas tipicamente, este valor é 2, 4 ou 8. O máximo alcance físico de uma ODN é de 20 km. Na prática, para assegurar um orçamento de potência satisfatório, enlaces de 20 km e razão de divisão 1:32 não são alcançados simultaneamente.

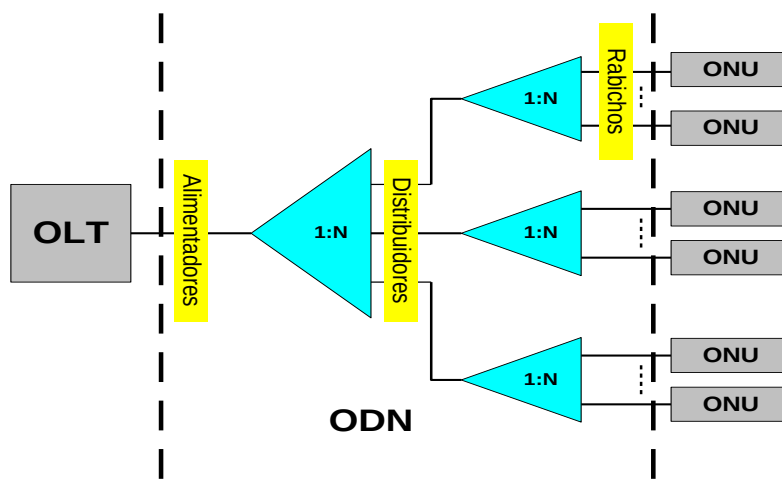


Figura 2.4: Posicionamento e razão de divisão de divisores ópticos em uma rede ODN

A transmissão descendente é do tipo broadcast, ou seja, cada ONT recebe todo o tráfego da rede (oriundo da OLT) e filtra sua parte. Na transmissão ascendente, cada assinante pode acessar a central apenas em um intervalo de tempo especificado pela OLT, para evitar colisão de tráfego. Esse esquema gera problemas: 1) segurança, devido ao compartilhamento do meio físico através de *slots* de tempo; 2) uso ineficiente da largura de banda disponível, pois intervalos de tempo ociosos não são utilizados por outro assinante; e 3) limitação no alcance e número máximo de assinantes (orçamento de potência). Redes TDM-PON empregam complexos esquemas de alocação dinâmica de largura de banda (DBA – *Dynamic Bandwidth Allocation*) e algoritmos para a alocação dos divisores de potência, ou seja, localização e especificação dos divisores. Se a capacidade da rede for exaurida, nova eletrônica deve ser instalada na central e nos terminais dos assinantes. Em adição, a topologia estrela usada nessas redes não contempla as importantes características de restauração e proteção, assim, no caso onde se obrigue alta disponibilidade, torna-se necessário a implantação de uma segunda abordagem, oriunda de outro ramo da rede.

Na direção descendente, voz e dados são combinados e enviados na região de comprimento de onda de 1490 nm; na direção ascendente, o tráfego é feito em torno de 1310 nm. Serviços de vídeo são disponibilizados apenas na descendente, no comprimento de onda de 1550 nm, e constitui uma alternativa para redes HFC que oferecem serviço multimídia (voz, dados e vídeo) ao cliente. Usualmente, para reduzir custos, uma única fibra óptica monomodo é usada para a transmissão bidirecional e os canais são multiplexados utilizando a tecnologia WDM.

A Figura 2.5 ilustra as interfaces na OLT e ONT para redes determinísticas TDM (E1, SDH, STM-1,4), onde as taxas de transmissão de cada circuito é fixa e pré-determinada, e redes estatísticas Ethernet (Fast/Giga/10Giga), onde as taxas de cada circuito pode variar.

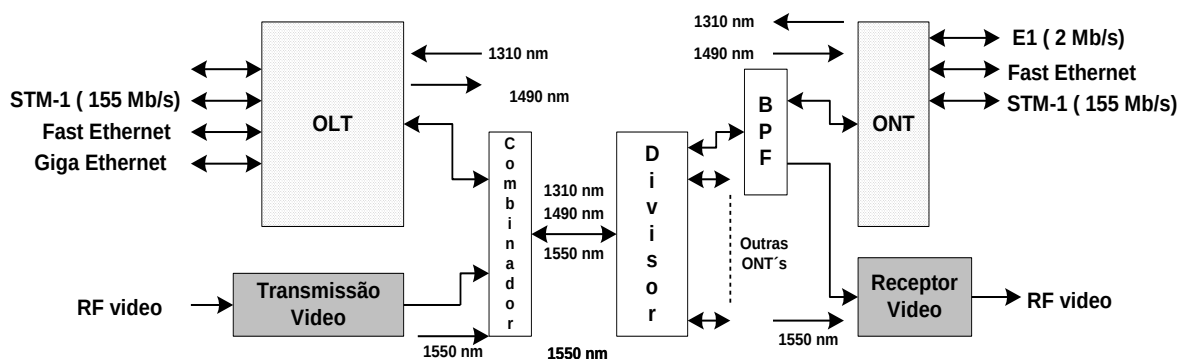


Figura 2.5: Interfaces TDM e Ethernet na OLT e ONT

### 2.2.1 Padronização de Redes TDM-PON

O consórcio FSAN, formado por mais de 80 membros pertencentes a organizações em todo o mundo, incluindo mais de 20 operadoras de telecomunicações, tem prestado enorme colaboração no desenvolvimento dessas tecnologias e na definição de padrões. O consórcio interage com o ITU-T, no sentido de adequar os padrões estabelecidos em suas recomendações e facilitar sua aplicação.

Além disto, o FSAN tem também como objetivo promover a total interoperabilidade entre os diversos sistemas, atuando junto aos fornecedores, apesar das dificuldades relacionadas aos aspectos estratégicos e financeiros. Outra missão de alta relevância prestada pelo FSAN é a sua participação no desenvolvimento dos sistemas de nova geração, bem como no estudo que visa à reutilização do legado das tecnologias anteriores.

Na época de formação do grupo FSAN, em 1995, o protocolo ATM era a mais conhecida e promissora tecnologia de transporte e sinalização. Um conjunto de especificações técnicas foi produzido e submetido ao ITU-T, que aprovou em 1998 a recomendação ITU-T G.983.1, resultando nas primeiras redes PON baseadas em ATM (APON), com taxa simétrica de 155 Mb/s. Este padrão utiliza a técnica de *ranging*, que permite que todas as ONT's estejam a uma mesma distância lógica da OLT (embora as distâncias físicas sejam diferentes), para evitar colisão de pacotes. Os sistemas são classificados com relação às perdas totais (fibra e divisor

de potência) e podem ser do tipo: classe A (5-20 dB); classe B (10-25 dB); classe C (15-35 dB). Por exemplo, para as classes B e C, a potências transmitida pela ONT deve variar entre  $-4$  e  $+2$  dBm e  $-2$  e  $+4$  dBm, respectivamente.

O entusiasmo inicial, no entanto, foi dominado por um mercado potencialmente limitado. Para se tornar competitiva do ponto de vista econômico, uma rede PON deve possuir um número suficiente de assinantes para compartilhar os elevados custos associados, e aproveitar a enorme capacidade de banda das redes ópticas.

Seguidos esforços do consórcio FSAN permitiram o desenvolvimento de novos esquemas de redes TDM-PON. Atualmente, as soluções mais adotadas são: BPON, EPON e GPON. A Figura 2.6 mostra, de forma esquemática, a evolução histórica dos padrões de rede TDM-PON. Como pode ser observado, o padrão GPON herda características do padrão BPON. Para as arquiteturas WDM-PON e OCDMA-PON, ainda não há padrões estabelecidos.

Os padrões BPON, EPON e GPON usam a mesma arquitetura de rede TDM-PON descrita anteriormente, mas diferem nos protocolos empregados, que são sumarizados a seguir.

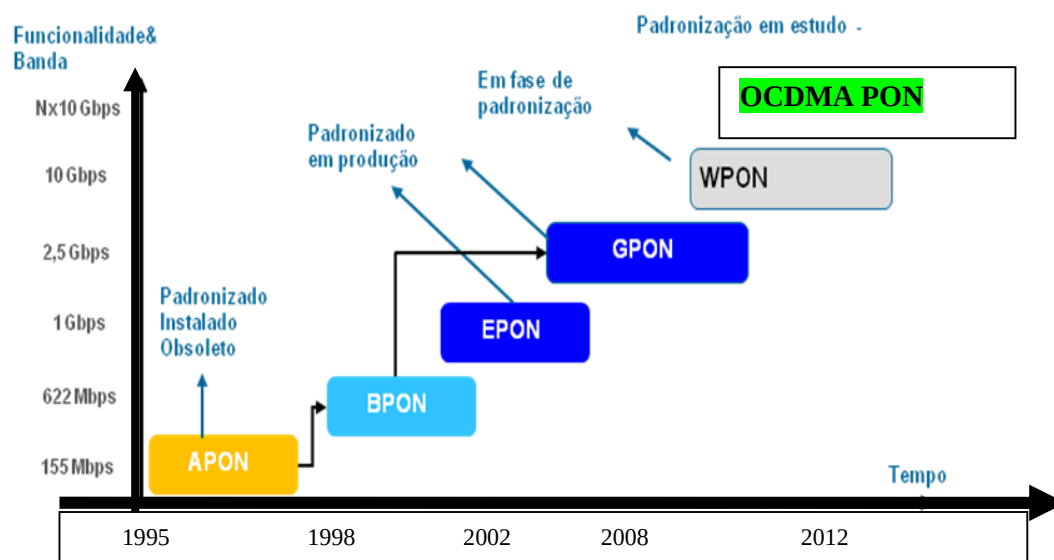


Figura 2.6: Evolução histórica dos padrões de redes TDM-PON

Fonte: Wikipedia

### 2.2.1.1 *BroadBand* PON (BPON)

O padrão BPON está descrito na série de recomendações ITU-T G.983.1-8 e recebeu sua última revisão em 2005. O padrão APON é hoje um subconjunto desta categoria, que também utiliza a tecnologia ATM, com taxa assimétrica (622 Mb/s / 155 Mb/s). Algoritmos de *ranging* são também utilizados para evitar colisão. Oferece qualidade de serviço (QoS), mas baixa eficiência de transmissão. Redes BPON começaram a ser adotadas no início de 2001, nos Estados Unidos, contudo hoje já podem ser consideradas legadas.

### 2.2.1.2 Ethernet PON (EPON)

O padrão EPON, aprovado em 2004 e descrito nas recomendações IEEE 802.3ah EFM, encapsula e transportam dados utilizando o formato Ethernet, simplificando o transporte de pacotes IP e a interoperabilidade com redes LAN e MAN instaladas. Genericamente, o termo EFM (*Ethernet-in-the-first-mile*) é utilizado para designar o uso do padrão *Ethernet* na rede de acesso. Redes EPON vêm sendo adotadas desde meados de 2004, principalmente em países asiáticos, e têm taxa de transmissão simétrica de 1,2 Gbp/s, sendo também denominadas GEPON (padrão IEEE 802.3z). Dois importantes grupos atuantes no setor são: EPON Forum e *Ethernet in the First Mile Alliance* (EFMA).

Uma alternativa ao uso do padrão EPON são as redes Ethernet P2P, com fibras dedicadas e operando em taxas de até 100 Mb/s. Redes P2P têm arquitetura simples, mas custo elevado e estão descritas na recomendação ITU-T G.985 (2003).

### 2.2.1.3 Gigabit PON (GPON)

O padrão GPON, descrito na família de recomendações ITU-T G.984.1-4 (2003), tem arquitetura mais versátil (suporta ATM, Ethernet, IP), é capaz de prover acesso em taxas simétricas mais elevadas, de até 2,4 Gbp/s, além de gerenciar até 64 usuários (comparado aos 32 usuários dos outros padrões). Redes GPON vêm sendo adotadas desde o final de 2005. Em contraste às arquiteturas BPON e EPON, que foram desenvolvidas do ponto de vista dos



fornecedores de equipamentos, uma rede GPON tem projeto mais voltado para o usuário, que se reflete através da especificação de múltiplos serviços.

O padrão GPON utiliza ferramentas para alocação dinâmica de largura de banda. Isso é feito através de contêineres de transmissão, conhecidos como (T-CONT  $n$ ), o que permite a implementação de QoS diferenciada, de acordo com o valor de  $n$ . Alguns tipos de (T-CONT  $n$ ) podem ser alocados para o cliente. Por exemplo, T-CONT 1 garante largura de banda fixa para serviços sensíveis a retardo, como voz sobre IP (VoIP), assim como ATM o fazia com a condição CBR (*Constant Bit Ratio*). O padrão GPON é a principal escolha na América do Norte, Europa, Oriente Médio, e também no Brasil, por esse motivo, objeto de estudo no presente trabalho.

A Tabela 2.2 sumariza as principais características dos padrões de redes TDM-PON: BPON, EPON e GPON.

Tabela 2.2: Características dos padrões de redes TDM-PON

| Característica                   | BPON        | EPON         | GPON         |
|----------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| Padrão                           | ITU-T G.983 | IEEE 802.3ah | ITU-T G.984  |
| Protocolo                        | ATM         | Ethernet     | ATM/Ethernet |
| Velocidade de Transmissão (Mb/s) | 622/155     | 1244/1244    | 2488/1244    |
| Alcance máximo (km)              | 20          | 10           | 20           |
| Número máximo de divisores       | 32          | 32           | 32/64        |

### 2.3 REDES WDM-PON

Para aliviar algumas das limitações associadas às redes TDM-PON, esta seção apresenta uma alternativa de compartilhamento da fibra entre os usuários, baseada em multiplexação e acesso ao meio por divisão de comprimento de onda (WDM/WDMA). Uma solução proposta na literatura tem como objetivo aproveitar a planta TDM-PON instalada e, para isso, todos os sinais (diversos comprimentos de onda) devem estar na banda passante do divisor de potência. Esta configuração híbrida é denominada TDM/WDM-PON. Outra solução, mais promissora e largamente analisada na literatura, é denominada WDM-PON. Esta rede está ilustrada na Figura 2.7, e é objeto de estudo neste trabalho.

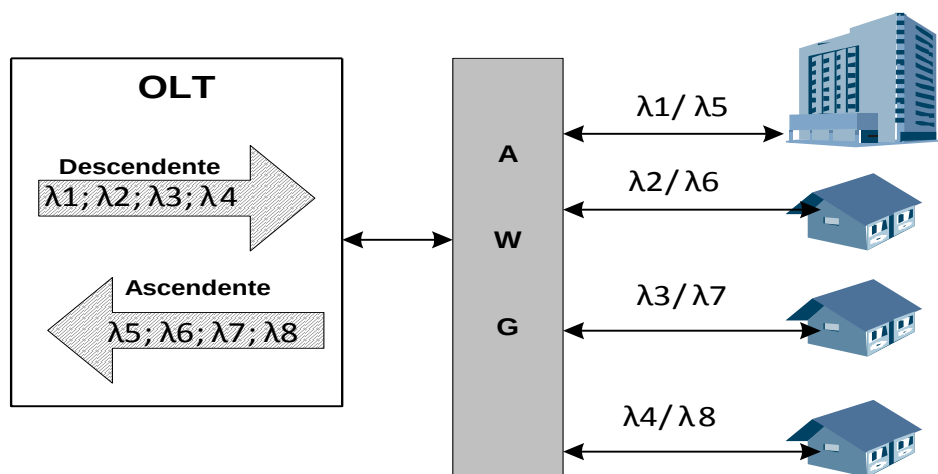


Figura 2.7: Arquitetura básica de uma rede WDM-PON com AWG

Redes WPON permitem aumento da largura de banda e melhor orçamento de potência, uma vez que cada ONT tem um par (descendente/*usptream*) de comprimentos de onda dedicado a ela. A rede física é ponto-multiponto (P2MP), mas do ponto de vista lógico, a rede é ponto-a-ponto (P2P), o que confere flexibilidade e maior oferta de serviços. Diferentes ONTs podem operar com diferentes taxas de transmissão e protocolo.

O principal elemento da rede é o roteador passivo denominado AWG (*Array Waveguide Grating*), também chamado WDM passivo, ou ainda *splitter*, instalado em um nó remoto (RN), que se localiza onde antes estava o divisor de potência óptica. O dispositivo AWG é uma rede de difração baseada em arranjos de guia de onda, tem natureza periódica ou cíclica, o que permite que os comprimentos de onda descendente e ascendente de uma dada ONT sejam roteados para uma mesma porta do dispositivo.

Os comprimentos de onda são alocados na janela de 1550 nm e têm espaçamento de 100 GHz. Na descendente, esses comprimentos de onda são gerados por uma fonte sintonizável localizada na OLT, e roteados pelo AWG para as diversas ONTs. Os comprimentos de onda oriundos das ONTs são demultiplexados na OLT utilizando um demultiplexador WDM. Essa configuração é ilustrada na Figura 2.8.

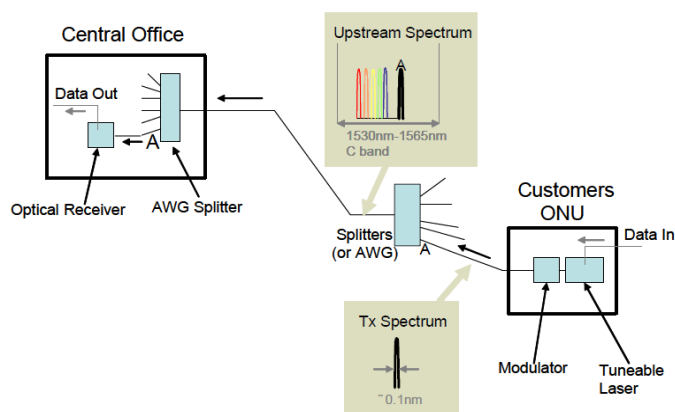


Figura 2.8: Configuração básica de rede WDM-PON com laser sintonizável  
Fonte: [CIP TECHNOLOGIES, 2008].

Tipicamente, os comprimentos de onda na direção descendente e ascendente são intercalados, para melhor aproveitar a largura de banda do AWG e minimizar a interferência entre canais (*crosstalk*). Além disso, para reduzir custos de gerência e manutenção, a configuração das diversas ONT's é, dentro do possível, idêntica.

Redes WDM-PON têm muitas vantagens quando comparadas com redes TDM-POM: o número de usuários é limitado apenas pelo número de portas do AWG; a largura de banda máxima depende de restrições físicas dos equipamentos; há facilidade de *upgrade* e independência de protocolo. Adicionalmente, os AWGs têm perda de inserção consideravelmente menor (3,5 a 5,5 dB) que os divisores de potência (em torno de 9 dB), considerando dispositivos de 8 portas em ambos os casos.

A maior desvantagem é o elevado custo dos equipamentos. No caso de operadoras com diversas redes, esse problema é, em parte, minimizado, através da reutilização de comprimentos de onda, o que reduz o número total de AWG's. Esta solução, no entanto, não reduz o número de lasers nas ONTs e as correspondentes e complexas tarefas de manutenção e gerenciamento do inventário de lasers.

Uma alternativa consiste em utilizar uma fonte de luz de faixa larga na ONT, por exemplo, um LED e, no processo de multiplexação, parte do espectro é fatiada. Considerando que todas as ONTs possuam as mesmas fontes ópticas de faixa larga, e que cada uma delas esteja conectada a uma porta distinta, diferentes fatias do espectro espalhado serão transmitidas pela rede. Essa técnica tem como desvantagens: perdas elevadas na divisão espectral; saída incoerente (LED); transmissão de alguns poucos Mb/s.

É possível ainda usar opcionalmente um amplificador óptico semicondutor (SOA–*Semiconductor Optical Amplifier*) ou um RSOA (*ReflectiveSOA*), como transmissor nas ONT's, aproveitando-se de suas características reflexivas, decorrentes do fenômeno SSE (*Self Spontaneous Emission*) conforme detalhado por [AGRAVAL]. Esta opção tem a vantagem de produzir uma potência óptica de saída maior, para uma menor corrente de excitação; entretanto, apresenta como desvantagem uma sensibilidade às potências refletidas, o que resulta na produção de *ripple* no espectro de saída. Quando se usa um SOA, a banda fica limitada, por exemplo, a alguns poucos canais de 155 Mb/s, enquanto que com o RSOA, é possível ter-se em operação, sistemas com até 32 x 155 Mb/s. O número de canais e a taxa de transmissão de cada um deles dependem da intensidade do ruído causado pelo processo de segmentação da banda, ou mais especificamente, da relação taxa de bit/largura de banda da fonte. A Figura 2.9 ilustra esta configuração, onde se observa o pulso “A” de maior amplitude e baixa largura espectral de 10 nm, sendo encaminhado para a OLT através do divisor WDM.

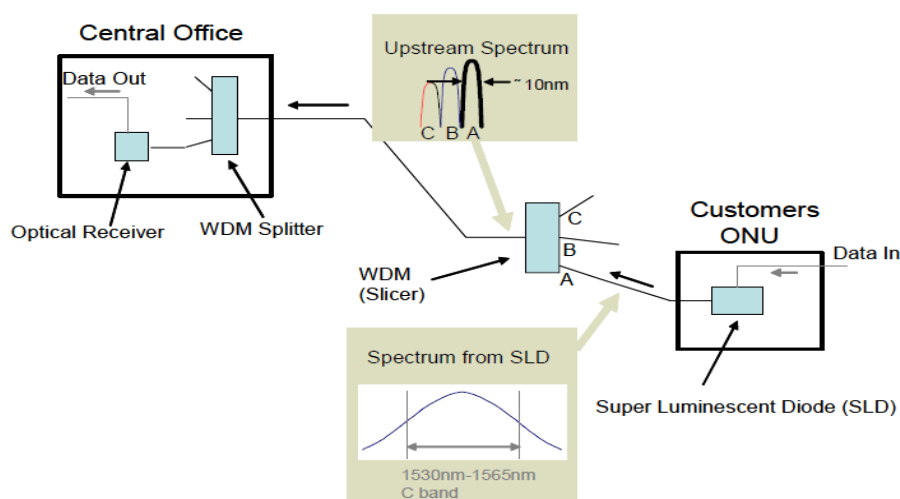


Figura 2.9: Configuração com LED super luminescente na ONT  
Fonte: [CIP TECHNOLOGIES, 2008].

## 2.4 REDES OCDMA-PON

A tecnologia OCDMA vem sendo apontada na literatura como uma das mais promissoras para aliviar o “gargalo” no acesso à última milha e tem como característica fundamental a definição de uma sequência de assinatura (código óptico) para cada usuário. Os diversos códigos são transmitidos simultaneamente na fibra.

Algoritmos de codificação são desenvolvidos, visando aumentar a cardinalidade (quantidade disponível de códigos e, portanto, de usuários) e ortogonalidade (diferenciação

entre os códigos). A codificação pode ser feita no domínio do tempo (chips temporais, definidos posteriormente), da frequência (comprimentos de onda) ou de ambos, o que confere flexibilidade às redes. Assim, quando apenas uma destas grandezas é manipulada, diz-se que o código possui apenas uma dimensão (código 1-D). Quando duas ou mais grandezas são manipuladas, os códigos são do tipo: 2-D (bidimensionais) ou 3-D (tridimensionais). Exemplos de códigos são baseados em: TS (*Time Spreading*) e WH (*Wavelength Hopping*).

As redes ópticas baseadas em OCDMA podem atender a um número maior de usuários, em consequência do grande número de sequências disponíveis, quando comparadas com redes convencionais, que empregam TDMA e WDMA. Nos sistemas de pequenas e médias distâncias, foco do presente trabalho, a interconexão óptica com todos os elementos da rede é realizada passivamente por meio de acopladores em configuração estrela nas duas extremidades da fibra óptica. Assim sendo, todos os sinais dos usuários trafegam pela mesma fibra, assim como ocorre nas redes PON.

A Figura 2.10 ilustra uma rede OCDMA básica, indicando a transmissão de todos os usuários de forma simultânea e com o espectro espalhado.

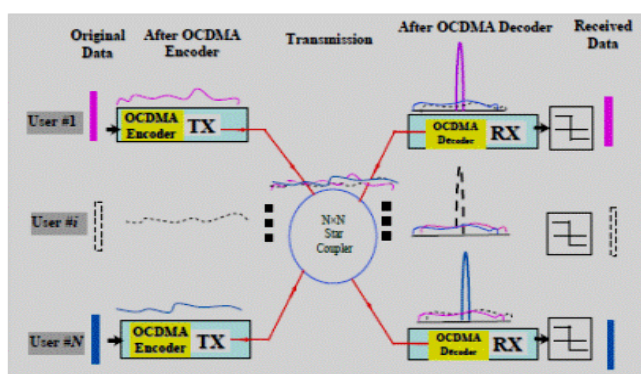


Figura 2.10: Diagrama básico da topologia OCDMA

Fonte: FRIGYES, 2006]

Pode-se observar que somente o receptor que possui o código específico, consegue decodificar a informação associada, utilizando um processo conhecido como “auto-correlação”.

Em uma rede OCDMA-PON, a OLT e as ONT’s são adaptadas para operar com os códigos. O sinal modulado, por exemplo, deve conter informações sobre a sequência de assinatura para que o usuário possa ser identificado. Essas redes têm arquitetura simples, baixa latência na transmissão, capacidade de suportar acessos assíncronos simultâneos de múltiplos usuários e transparência a protocolos. Por outro lado, o fato de diversos usuários utilizarem

simultaneamente a rede, gera uma interferência multiusuário (MAI – *Multiple Access Interference*). Uma importante figura de mérito da rede é a razão sinal-interferência (SIR – *Signal-to-Interference Ratio*), que aumenta quando o número de usuários simultâneos diminui.

Em consonância com o objetivo maior desse estudo que é avaliar soluções de última milha para aplicações em banda larga, a análise está limitada aos códigos 1-D, nos domínios temporal e espectral. Na codificação temporal, o bit de informação é codificado como uma sequência de pulsos ultracurtos (bits 1 e 0) de característica pseudo-randômica, denominados chips, que possuem um período muito menor ( $T_c$ ) que os bits de informação ( $T_i$ ). O período do bit de informação ( $T_i$ ) é subdividido em  $L$  períodos de chips ( $T_c$ ), conforme ilustra a Figura 2.11. O valor de  $L$ , portanto, designa o tamanho do código (ou o número de chips).

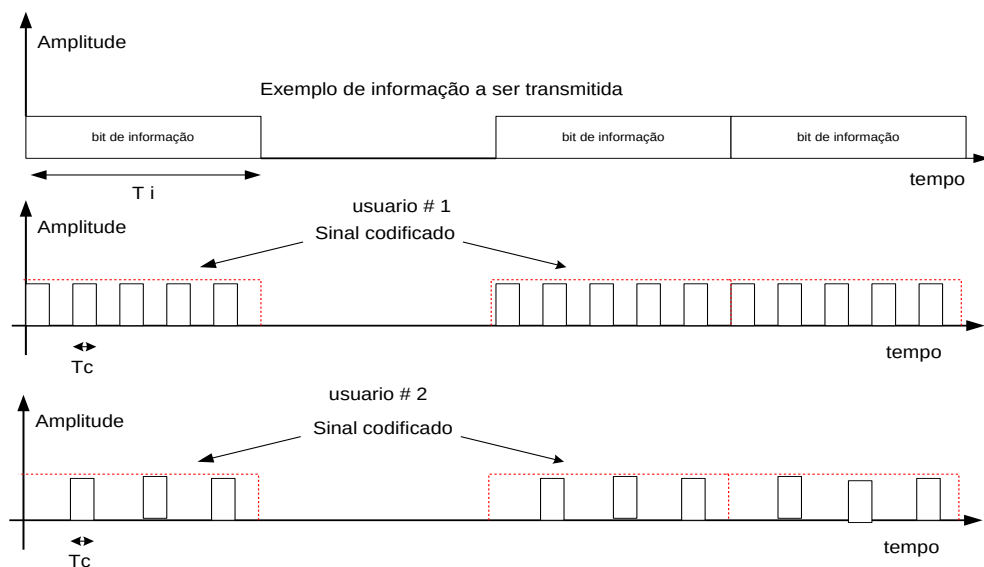


Figura 2.11: Codificação do bit de informação

Além da codificação temporal temos a codificação espectral, onde a dimensão espacial é explorada em implementações práticas, pela utilização de moduladores espaciais de luz, SLM (*Spatial Light Modulators*), caracterizando, assim, o espalhamento espacial (*Spread Space*) [LIN C.H. ET AL, 2005]. Nessa codificação, é gerado um sinal de banda larga (não modulado), o qual é, em seguida, espectralmente decomposto. Nesse processo de codificação, a fase ou a amplitude das componentes espectrais são moduladas de acordo com o código apropriado, possibilitando assim dois tipos de codificação conhecidos como: *Spectral Phase Coding* (SPC) e *Spectral Amplitude Coding* (SAC).

No esquema denominado SPC, o sinal de informação modula um pulso óptico bastante estreito [PHAM, 2005]. Utilizando-se o processo da transformada de *Fourier*, este pulso é

decomposto em suas componentes espectrais, que são multiplicadas pelos códigos, causando um desvio de fase de 0 ou  $\pi$ . As componentes são obtidas utilizando-se a configuração apresentada na Figura 2.12 (a), para as quais se utiliza uma estrutura de grade e um par de lentes, ilustrado na Figura 2.12 (b). O resultado da codificação de fase é um pulso de baixa intensidade e de longa duração, razão pela qual essa técnica é também conhecida como espectro espalhado (*Spread Spectrum*).

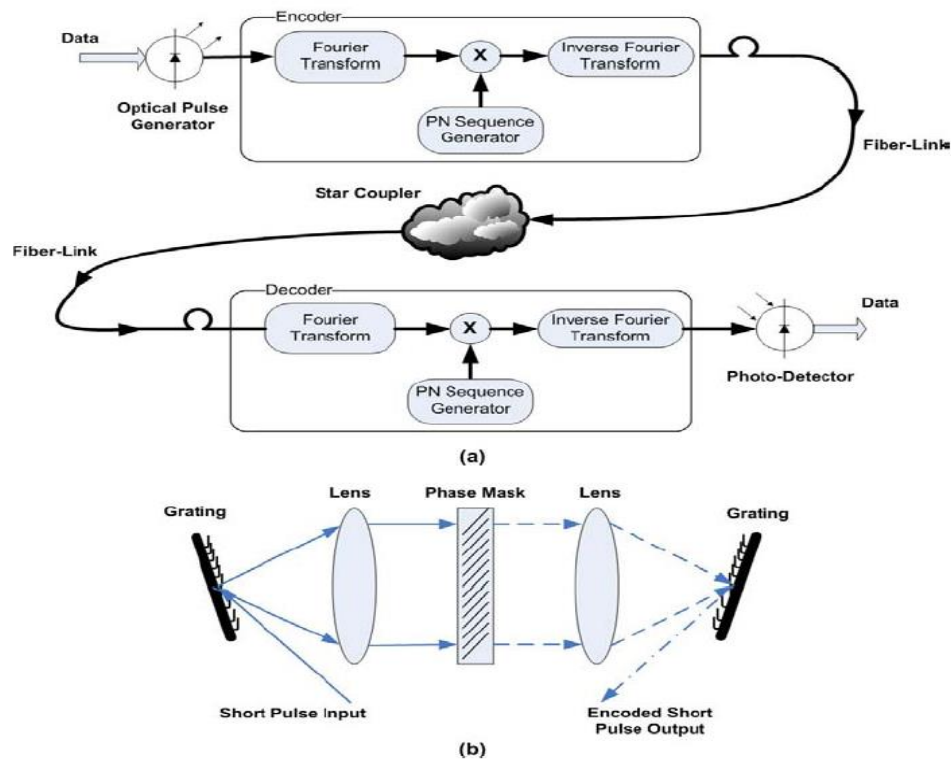


Figura 2.12 (a) e (b): Configuração básica da codificação Spread Spectrum  
Fonte: [PHAM, 2005]

No esquema SAC, as componentes espectrais provenientes de um sinal de banda muito larga são codificados (ora bloqueados, ora transmitidos) de acordo com um determinado código associado a cada usuário. A Figura 2.12 (c) ilustra tal configuração.

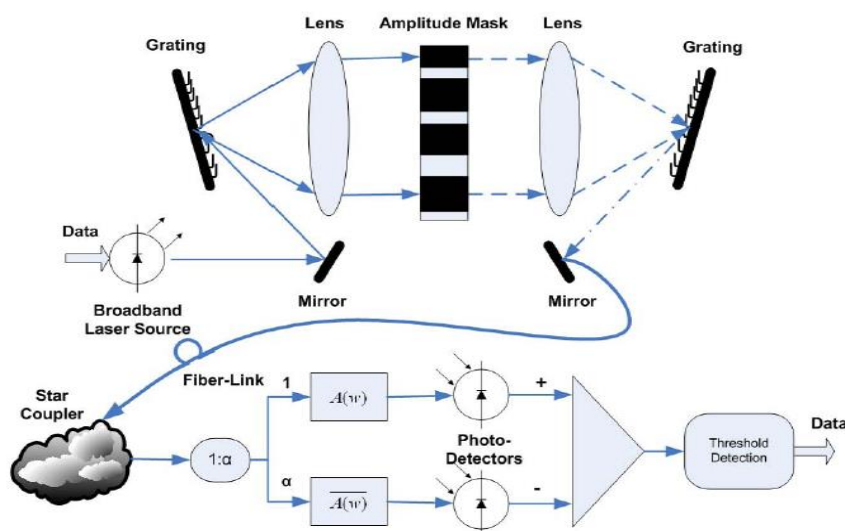


Figura 2.12 (c): Configuração básica da codificação SAC  
 Fonte : [PENON J. ET AL,2000]

No lado da recepção, o sinal passa por um filtro idêntico ao usado na transmissão. A saída dos filtros principais e complementares é encaminhada para dois fotodetectores na configuração balanceada. O sinal interferente que não está correlacionado ao código específico é cancelado, enquanto o sinal associado será demodulado com a ajuda do detector de limiar. Assim sendo, nesse tipo de configuração, não haverá o efeito MAI.

Em todas as configurações, busca-se aumentar a cardinalidade e melhorar a ortogonalidade dos códigos. Os principais obstáculos estão relacionados à camada física, mais especificamente, aos dispositivos optoeletrônicos empregados nessas soluções.

## 2.5 REDES HÍBRIDAS

Até o momento, as características fundamentais, vantagens e desvantagens de redes baseadas nas tecnologias TDMA, WDMA e OCDMA foram discutidas. Alguns estudos apontam para a combinação dessas tecnologias, com o objetivo de tirar o melhor proveito de cada uma delas, formando assim redes híbridas. Nesta seção são relatados trabalhos apresentados na literatura para duas configurações híbridas: WPON/GPON e WPON/OCDMA-PON.



A configuração WPON/GPON é a mais tradicional, e alia a simplicidade e o baixo custo dos sistemas TDM com a escalabilidade dos sistemas WDM. Na configuração mais básica, uma rede GPON tradicional pode ser estendida, através da inserção de novos usuários, cada qual em um distinto comprimento de onda, que compartilham a mesma fibra óptica. Para tal, um dispositivo do tipo AWG é usado nos lados da transmissão e recepção, combinando e separando a rede GPON e os usuários extras, respectivamente. Essa situação é ilustrada na Figura 2.13. Observa-se que as redes GPON e WPON são independentes no domínio óptico. A conexão entre as redes ocorre no domínio óptico, através de dispositivos (acopladores de comprimento de onda), indicados na figura como WC1 e WC2.

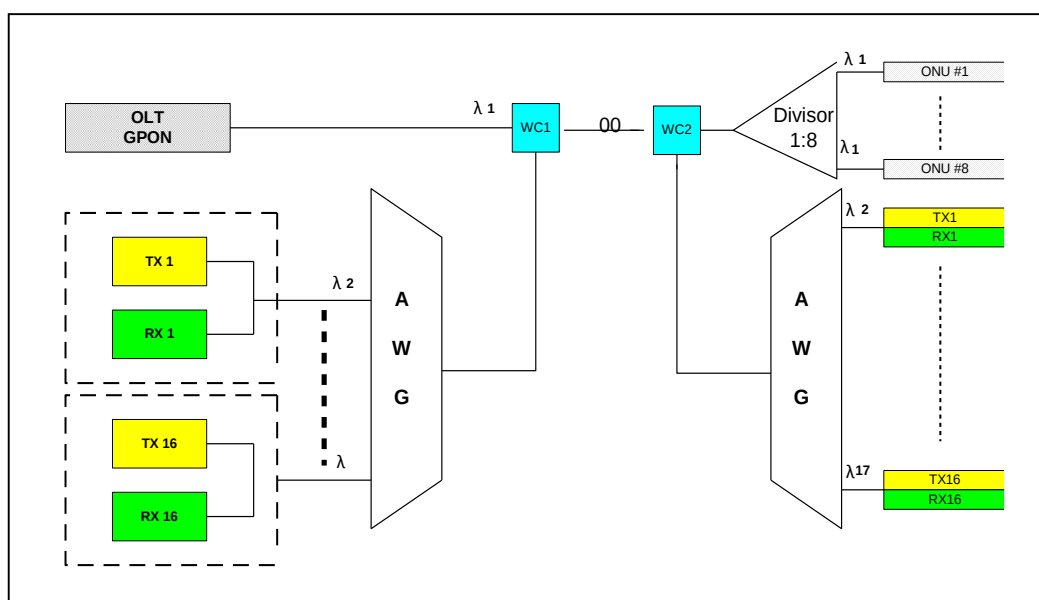


Figura 2.13: Configuração básica WPON/GPON com redes independentes

Ressalta-se que as ONTs associadas à rede GPON não têm suas taxas ou capacidades acrescidas, enquanto que os usuários conectados diretamente às portas do AWG têm disponíveis capacidades comparativamente maiores. Em princípio, qualquer usuário da rede GPON pode migrar de forma total ou combinada para a rede WPON, passando a se conectar diretamente a uma porta do AWG, e mantendo ou não sua conexão original à rede GPON. A Figura 2.14 ilustra essa situação, onde o usuário # 8 tem acesso às duas redes, em diferentes comprimentos de onda.

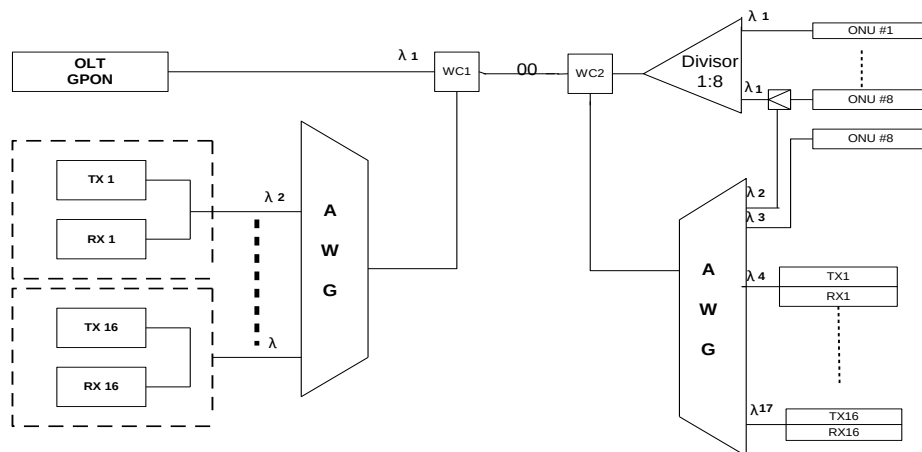


Figura 2.14: Configuração híbrida WPON/GPON

Uma variação mais robusta da configuração anterior considera várias redes GPON, agora conectadas através de uma rede WPON. Nesse sentido, cada comprimento de onda da rede WPON corresponde ao tráfego de uma rede GPON. Em princípio, o número de redes GPON's atendidas é limitado pelo número de portas do dispositivo AWG. O tráfego de todas as redes GPON é transmitido, simultaneamente, em uma única fibra óptica, o que aumenta substancialmente o número de usuários por fibra, além de permitir o compartilhamento do custo de um segmento WPON (um dado comprimento de onda) dentre os usuários de uma rede GPON. Considerando, por exemplo, um AWG de 16 portas e um divisor de potência de 32 portas, como o usado em redes GPON, ter-se-ia um total de 512 usuários. Entretanto, cabe ressaltar que esta solução compromete o orçamento de potência, em virtude dos combinadores e separadores adicionais que são necessários, tornando essencial a utilização de lasers nas OLTs e ONTs de maior potência, ou seja, classificados como classe C, conforme indicado no capítulo 2. Alternativamente, é possível optar por atender um número menor de usuários, porém, lhes destinando uma capacidade de banda maior.

Do ponto de vista de equipamentos, basta introduzir um dispositivo passivo no lado da operadora, do tipo AWG, que combina os sinais oriundos das várias redes GPON, cada qual em um comprimento de onda. No lado da recepção ocorre a operação reversa, onde um divisor passivo, também do tipo AWG, provê as correspondentes saídas no domínio do comprimento de onda. Como de costume, em cada rede GPON (que utiliza a tecnologia TDM), há um divisor/combinador de potência para entregar/recolher o tráfego das ONTs.



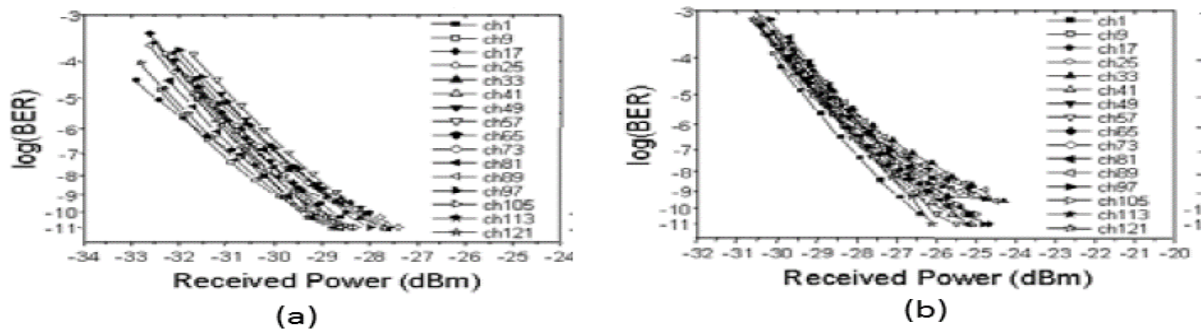


Figura 2.16: Variação da BER VS. potência de recepção: (a) sentido ascendente; (b) sentido descendente

Fonte: [SHIN, 2004].

O segundo caso também relata um teste experimental de uma configuração WPON/OCDMA-PON, ilustrado na Figura 2.17. O teste foi realizado entre duas cidades no Japão (Koganei e Tóquio), distantes 50 km, para uma topologia unidirecional, com setup configurado para teste em loop na cidade de Koganei, mas com as avaliações de desempenho realizadas na cidade de Tóquio [WANG, 2007].

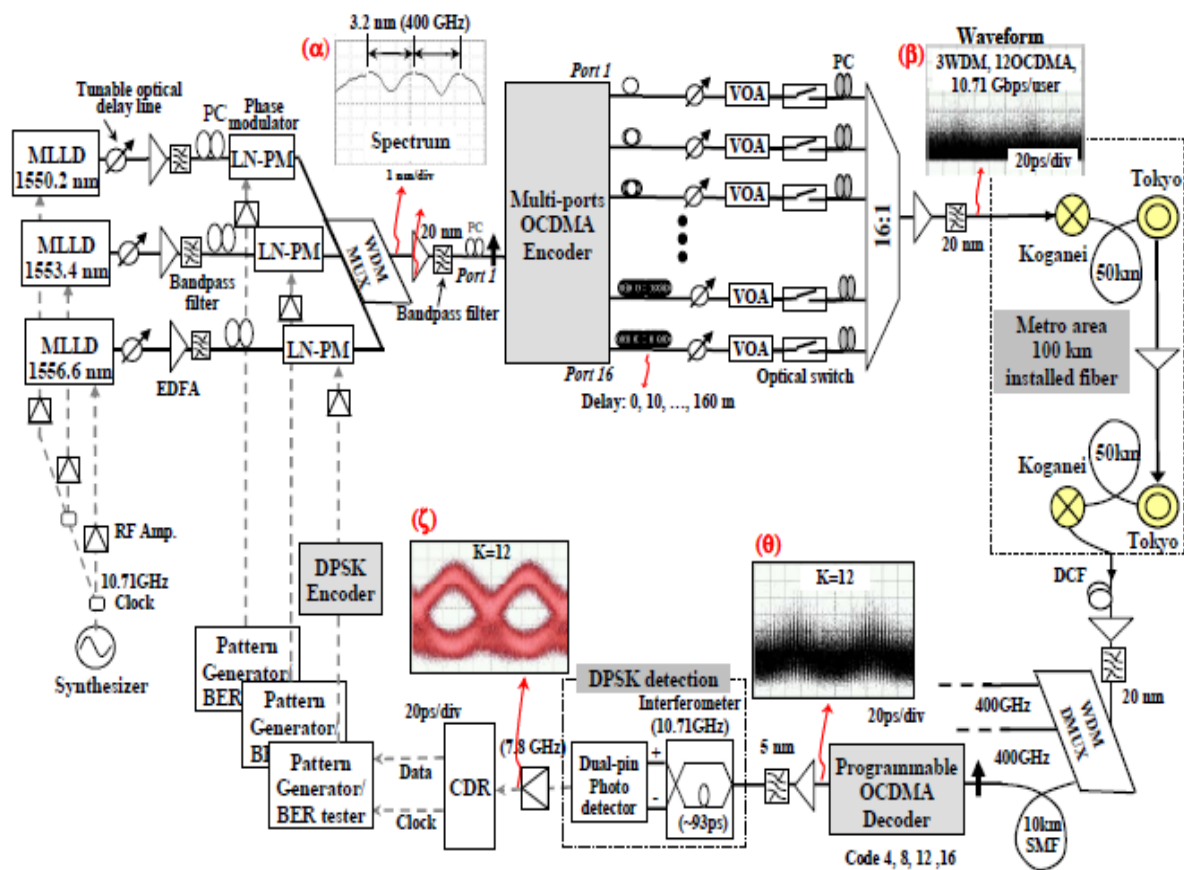


Figura 2.17: Setup de teste utilizado na experiência Koganei-Tóquio

Fonte: [WANG, 2007].

Seu funcionamento pode ser resumido da seguinte forma: os três MLLDs (Mode Locked Laser Diode) geram as portadoras ópticas de diferentes comprimentos de onda (1550,2; 1553,4 e 1556 nm), espaçados de 3,2 nm (400 GHz), ou seja, pulsos ópticos de duração aproximada de 1,8 ps. Esses sinais são modulados através de um modulador de niobato de lítio (LN-PM) e de um codificador DPSK, tendo como sinal modulante um padrão de teste (PRBS  $2^{31}-1$ ), com clock de 10,7 GHz e taxa de transmissão de 1,244 Gbp/s (taxa de informação). Esse conjunto de três portadoras moduladas e multiplexadas em WDM são encaminhadas a porta # 1 do codificador OCDMA de 16 x 16 portas (*Multi port 16 x 16 OCDMA encoder*), cujo espectro encontra-se ilustrado na Figura 2.18(a).

Na saída do codificador OCDMA, são disponibilizados 16 sinais de saída, cada qual com um código óptico específico, com um retardo de 10 milisegundos entre si, associado à cada uma das portas, operando com uma taxa de chip de 640 chip/s. Assim, cada uma dessas portas de saída está associada a uma porta de entrada, que incorpora as portadoras WDM indicadas anteriormente, dotando o sistema de uma capacidade máxima de 48 diferentes usuários (16 portas x 3 portadoras WDM).

Esses 16 sinais, então, podem ser combinados usando-se um combinador passivo de 16 portas, gerando um sinal único de banda muito larga ou espalhada (*Spread Spectrum*), devido à taxa de transmissão de 10,7 Gbp/s/usuário, resultado da associação da taxa de informação, com a da taxa de chip informada acima. A Figura 2.18(b) ilustra a forma de onda desse sinal combinado, cuja visualização se torna confusa considerando o valor da frequência/período associado.

Em seguida, este sinal é amplificado, filtrado e encaminhado para a rede óptica de fibra SMF instalada entre as cidades de Kogamei e Tóquio, na condição de *loop back*, ou seja, o mesmo retorna para ser avaliado em Kogamei, perfazendo então um total de 100 km.

O sinal WDM/OCDMA é de multiplexado no WDM que opera com 400 GHz de espaçamento entre os canais, sendo escolhido um desses quatro canais para ser demodulado no decodificador OCDMA, programado nesse caso, para selecionar os canais das portas # 4, #8, #12, #16, onde cada qual possui seu código óptico. A Figura 2.18(c) ilustra a forma de onda obtida na saída do decodificador OCDMA associado aos quatro canais selecionados, na verdade, relativo a 12 usuários, uma vez que cada um contem três diferentes portadoras WDM.

A demodulação DPSK foi implementada com a utilização de um interferômetro óptico e um detector balanceado, cuja saída pode ser avaliada pelo diagrama de olho apresentado na Figura 2.18(d) e também pela taxa de erro (BER) obtida do *test set*, que necessitou ser sincronizado com o sinal de clock recuperado da transmissão pelo circuito CDR (*clock data recovery*).

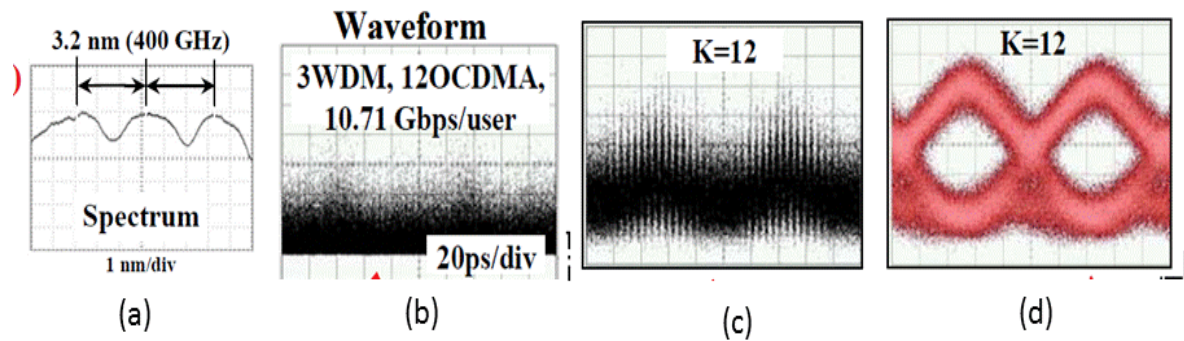


Figura 2.18: Análises no domínio da frequência/ tempo dos sinais de transmissão e recepção  
Fonte: : [WANG, 2007].

Uma análise subjetiva do diagrama de olho apresentado permitiu constatar a relativa qualidade da transmissão, considerando a “abertura do olho”, embora a figura disponibilizada pelo autor não forneça maiores detalhes.

A Figura 2.19(a) apresenta o desempenho da BER na condição de teste *back to back*, em relação à potência de recepção, para os quatro diferentes decodificadores nos três comprimentos de onda, para um usuário, e para 12 usuários. Para obter uma taxa de BER de  $10^{-10}$ , constatou-se a necessidade de um acréscimo de 8 dB na potência mínima de recepção, quando se aumenta de 1 para 12 o número de usuários. A eficiência espectral, que retrata a largura da banda de frequência necessária à transmissão de uma determinada taxa, foi determinada em: Eficiência espectral = Taxa de transmissão / largura de banda

$$= 10,7 \times 12 \text{ usuários Gbp/s/ } 400 \text{ GHz} = 0,32 \text{ bit/s/Hz}$$

A Figura 2.19 (b) apresenta o desempenho da BER na condição transmissão/recepção (ponto a ponto direto), considerando a mesma configuração de equipamentos adotados anteriormente. Observa-se que a condição anterior da BER só foi obtida para até 10 usuários, apresentando então uma eficiência espectral de 0,27 bit/s/Hz.

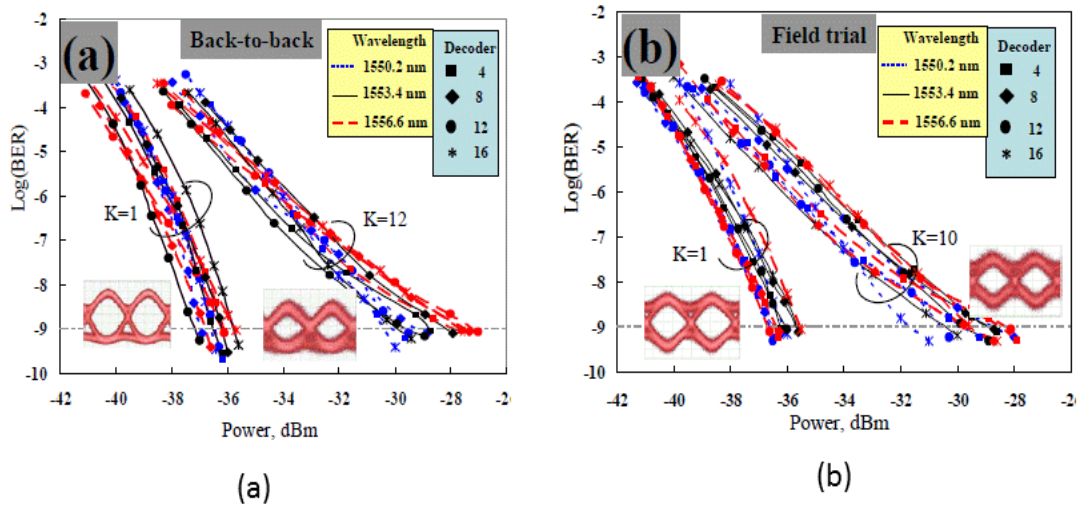


Figura 2.19: (a) BER vs. potência de TX back to back; (b) BER vs. potência de TX  
Fonte: [WANG, 2007].

## 2.6 PRINCIPAIS COMPONENTES EM UMA REDE ODN

Para finalizar a descrição de redes PON, esta seção apresenta, de forma sucinta, os principais componentes usados na rede de distribuição.

**2.6.1 - Divisor Óptico Passivo (Splitter):** caracterizado por razão de divisão 1:N, indicando que a potência óptica na porta de entrada é dividida, de forma simétrica ou assimétrica, em N portas de saída. Dois tipos básicos: FBT (Fused Biconical Taper) e PLC (Planar Lightwave Circuit). O tipo FBT tem menor custo, porém está limitado a duas portas de saída.

Nos divisores simétricos, a potência de entrada é dividida igualmente entre as portas de saída, e as razões de divisão podem ser: 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64 e 1:128. Quanto maior a razão de divisão, maior a perda de inserção introduzida pelo dispositivo. Os divisores assimétricos geralmente são do tipo 1:2 e a divisão de potência entre as portas de saída ocorre em passos de 10% (60/40, 70/30, 80/20, 90/10) ou de 5% (65/35, 75/25, 85/15, 95/5). Locais de atendimento (sites de clientes) dispersos e com baixa concentração de usuários, demandam redes PON com conjuntos de divisores assimétricos e simétricos com poucas portas, enquanto que sites concentrados demandam divisores simétricos com maior número de portas. A Figura 2.20 ilustra um divisor simétrico 1:4 e outro assimétrico (90/10).





Figura 2.20: Divisor de potência simétrico (1:4) e assimétrico (90/10)  
Fonte: Furukawa

É útil fazer o cascadeamento de divisores, de maneira a estender os ramos de uma rede PON. A boa prática indica um cascadeamento máximo três divisores por ramo PON, respeitando-se a potência óptica necessária para alcançar a ONT, e um número máximo de 32 pontos atendidos por ramo PON. A Figura 2.21 ilustra duas situações de cascadeamento: em dois e três níveis, perfazendo um total de 32 portas de saída.

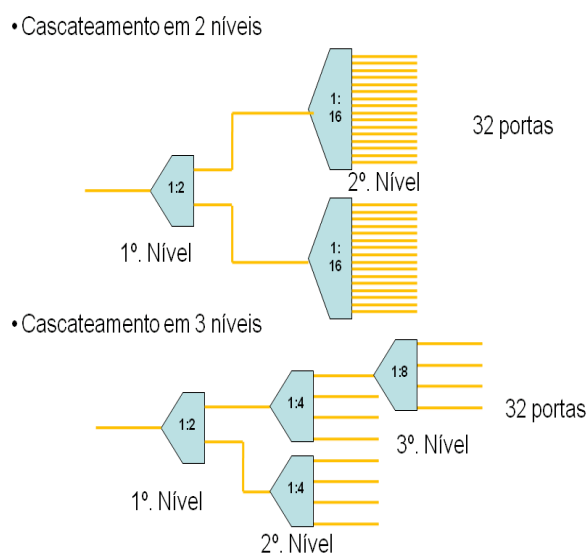


Figura 2.21: Cascadeamento de divisores em dois e três níveis  
Fonte: Furukawa

Do que foi exposto, é fácil concluir que o projeto de uma rede de distribuição deve ser criterioso, de forma a atender o orçamento de potência da rede PON. Projetistas devem levar em conta as particularidades de cada enlace, das quais se destacam: número e localização de usuários e necessidades de largura de banda, de forma a selecionar os componentes adequados. As possíveis configurações de divisores de potência são analisadas para que a melhor planta externa, em termos de custo vs. benefício, seja escolhida.



Atualmente, já se encontram disponíveis diversas ferramentas computacionais para auxiliar no cálculo do orçamento de potência. Algumas delas possuem módulos gráficos, outras possuem interfaces com outros sistemas AUTOCAD (*Computer Aided Design*) e de geoprocessamento, a exemplo do Google Maps.

Então, têm disponíveis no site da ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) [ESRI] vários aplicativos dentro do sistema ArcGis, dentre os quais se destacam para aplicações de geo-mapeamento: ArcMap e o ArcView. As informações inseridas no aplicativo podem ser visualizadas na forma de dados e na forma de layout, e podem ser salvas, impressas ou exportadas para arquivos PDF. Todavia, cabe ressaltar que esse sistema não considera estradas, pontes, viadutos, tampouco lagos, rios e oceanos.

Adicionalmente, vale destacar o sistema MapInfo, integrante do “pacote” de softwares do sistema GIS (*Geographical Information Systems*), que opera com a interface GUI (*Graphical User Interface*), de uso já consagrado pela sua facilidade de uso [MAPINFO, 2012].

Tais sistemas além de facilitar a elaboração do projeto propriamente dito, se constituem em uma importante ferramenta na fase de operação do sistema, uma vez que possibilitam o registro detalhado dos diferentes componentes da rede, entretanto ainda requerem uma integração com os sistemas de projeto dos componentes da rede óptica, de forma a facilitar a execução dos cálculos do orçamento de potência dos enlaces.

**2.6.2 - AWG (*Array Waveguide Grating*):** Esses dispositivos funcionam como combinadores/divisores, sendo que cada porta de entrada e saída está relacionada a apenas um comprimento de onda, ao contrário dos combinadores/divisores (divisores) convencionais usados nas redes TDM-PON, que fornecem saídas idênticas em suas portas. Utilizam tecnologia de guia de onda planar (PLC) baseado no princípio da difração, e também é chamado de guia de onda óptico (*optical waveguide*) ou roteador em guia de onda (*waveguide grating router*). Consiste de um conjunto de guias de onda curvados, conforme ilustrado na Figura 2.22 (a), com incrementos de valor fixo para as distâncias do próximo canal adjacente, conforme ilustrado na Figura 2.22(b).

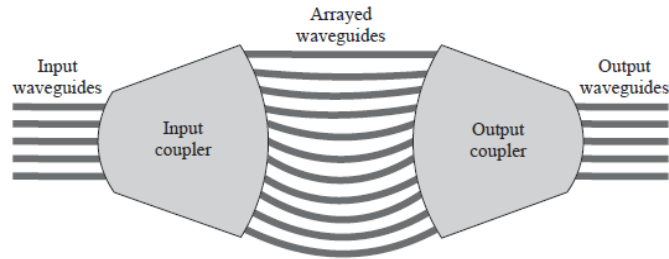


Figura 2.22: (a) Conjunto de guias de onda curvos;

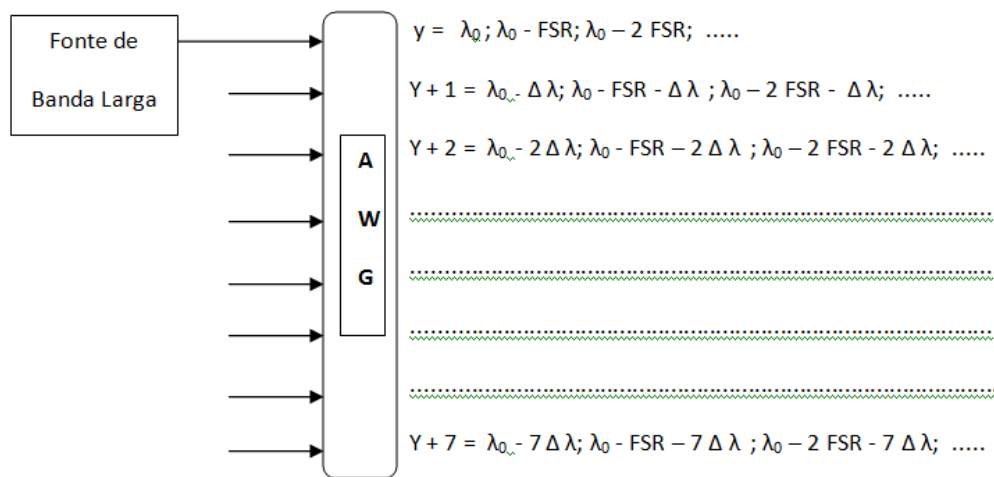


Figura 2.22(b) AWG de 8 canais com incrementos constantes entre canais adjacentes

Fonte: Agrawal

Tem-se disponível no mercado uma grande variedade de modelos, diferindo na quantidade de portas de entrada/saída, espaçamento entre os canais e com e sem controle automático de temperatura. A Figura 2.23 (a) e (b) apresenta dois desses modelos.



Figura 2.23(a): AWG fabricante JDSU

Fonte: JDSU

## Features

- One part can be used on any band of channels
- Can reduce inventory part numbers by up to 90%
- 8 skip 0 channel configurations
- Maximize bandwidth utilization
- Other configurations available
- Can match existing channel plans
- MSA compatible packaging
- MUX/DMUX in one package optional
- Telcordia GR-1209/1221 compliant
- Compact size conserves scarce rack space
- Semiconductor based mass production
- 4, 8 and 16 channel capability
- 50 GHz channel spacing
- Low insertion loss, high isolation increase system margin



Figura 2.23(b): AWG fabricante Neo-Photonics  
Fonte: Neo-Photonics

A Tabela 2.2 apresenta um resumo das principais características desses dispositivos, levando-se em conta a aplicação nas redes PON. Para os dois modelos apresentados, observa-se uma equivalência entre os parâmetros mais críticos.

Tabela 2.3: Principais características de AWGs comerciais

| Características                        | Neo-Photonics | GemFire |
|----------------------------------------|---------------|---------|
| Numero de canais                       | 8             | 8       |
| Espaçamento entre canais (GHz)         | 50            | 50      |
| Perda de inserção (dB)                 | 6             | 5.5     |
| Banda de passagem dentro de 1 dB (GHz) | 20            | 5,6     |
| Uniformidade (dB)                      | 1.5           | 1       |
| Isolação entre canais adjacentes       | 25            | 24      |
| Isolação entre canais não adjacentes   | ND            | 30      |
| Perda de retorno                       | 40            | 40      |

Fonte: Neo-Photonics & GemFire

### **3 AVALIAÇÃO DAS REDES PON**

Este capítulo apresenta um estudo comparativo das topologias de rede GPON, WDM-PON e OCDMA-PON. A Seção 3.1 apresenta o projeto de implantação da rede GPON – Embratel, do qual o autor integrou a equipe de operação, incluindo uma descrição detalhada da planta e uma análise de testes de campo realizados pela Embratel. A Seção 3.2 compara os custos de investimento (CAPEX) e de operação (OPEX) da tecnologia GPON com outras três alternativas de solução para a rede de acesso. As topologias WDM-PON e OCDMA-PON são avaliadas na Seção 3.3, através de simulações realizadas em uma versão de demonstração do software OptiSystem. Uma breve descrição deste aplicativo é dada na Seção 3.4.

#### **3.1 PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DA REDE GPON – EMBRATEL**

Esta seção tem como objetivo descrever o projeto de implantação da rede GPON – Embratel, do qual o autor participou em sua fase inicial, o que permitiu a obtenção de dados mais detalhados. Para melhor compreensão, na Seção 3.1.1, uma visão geral da rede Embratel é apresentada e, em seguida, na Seção 3.1.2, a planta da rede GPON – Embratel é detalhadamente descrita. A Seção 3.1.3 lista, em tabelas, as principais especificações e características estabelecidas para o desenvolvimento do projeto GPON – Embratel, com base nas normas ITU-T. Os principais resultados dos testes de campo realizados pela Embratel são apresentados e comentados na Seção 3.1.4.

### 3.1.1 Visão Geral da Rede Embratel

A Figura 3.1 mostra uma visão geral da rede da Embratel. Os diversos segmentos da rede são destacados: à esquerda, a estação principal da Embratel (*backbone*); no centro, a estação secundária da Embratel POP (ponto de presença operação) ou PPC (Ponto de presença de cliente); à direita, as dependências dos usuários (assinantes / clientes Embratel).

Há várias estações secundárias, que são estrategicamente distribuídas, de forma a atender as regiões potencialmente interessantes do ponto de vista do custo (CAPEX/OPEX) vs. benefício. A rede de transporte, que conecta as estações PPC ao *backbone*, é constituída de anéis ópticos SDH de alta capacidade, com interfaces e mapeamento dos circuitos compatíveis com o padrão Ethernet, razão pela qual é denominada de rede SDH de nova geração (SDH NG). Alternativamente, essa conexão pode ser feita através de redes estatísticas Metro-Ethernet e, em casos específicos, podem ser utilizados enlaces de micro-ondas de alta capacidade (8 x 155 Mb/s) ou enlaces via satélite (n x 34 Mb/s limitados a 155 Mb/s).

Em cada estação secundária PPC, há um terminal de linha óptico (OLT), que é conectado aos diversos terminais de rede ópticos (ONTs), formando a rede GPON de última milha. A interligação da rede SDH NG com a rede GPON, especificamente com a OLT, é feita na taxa de 100 Mb/s (interface FETH- Fast Ethernet) ou na taxa de 1 Gbp/s (interface GETH- Giga Ethernet), dependendo das capacidades envolvidas.

Os módulos ativos da rede GPON consistem em um terminal de linha óptico (OLT) e em terminais de rede ópticos (ONTs), localizados na central e nas dependências do assinante, respectivamente. A rede óptica externa, usualmente referida como rede de distribuição óptica (ODN – *Optical Distribution Network*), compreende o caminho óptico estabelecido entre o OLT e o ONT, e tem característica totalmente passiva. Adicionalmente, a divisão da potência óptica incidente é feita por um divisor de potência 1:N. A extensão máxima entre a OLT e a ONT é de 20 km.

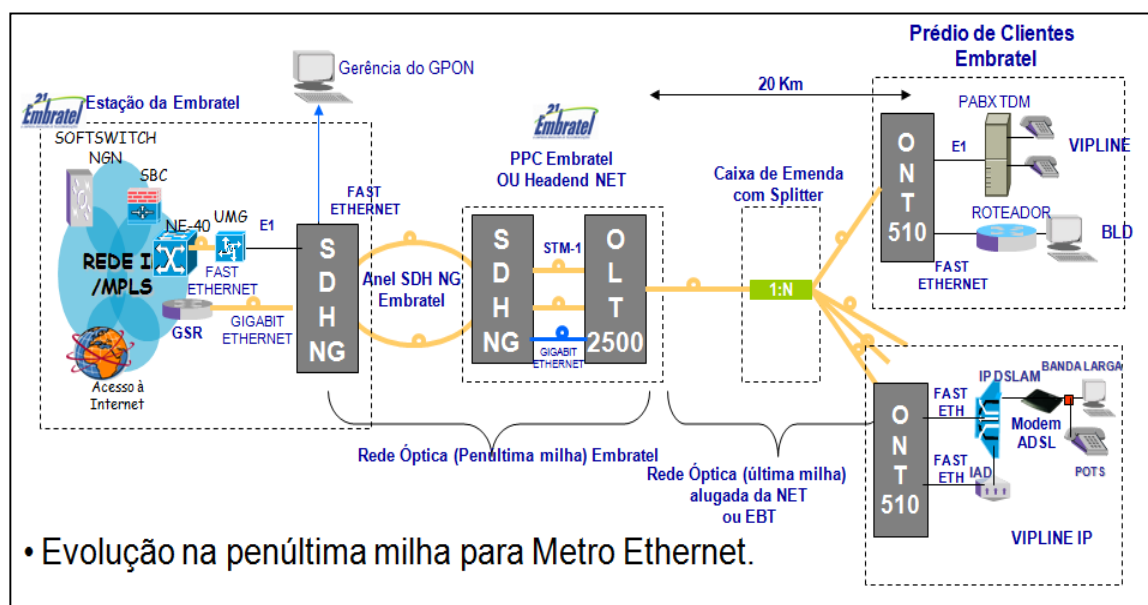


Figura 3.1: Visão geral da rede Embratel  
Fonte: Embratel

Considerando a diversidade de interfaces e serviços disponibilizados pelos equipamentos GPON, englobando aplicações de voz, dados e vídeo, é de extrema importância que todo este tráfego seja transportado por uma única rede de comutação de serviços, neste caso, a rede de comutação por pacotes IP/MPLS (Internet Protocol/Multi Protocol Label Switch).

Atualmente, a Embratel está ativando circuitos de dados para atendimento a serviços L2L (LAN to LAN) e BLD (Banda Larga Digital), via rede MPLS, com taxa efetiva / garantida de até 100 Mb/s (interface FETH), antes atendida pelas redes de transporte SDH.

Nas dependências do assinante (ONT), observa-se, ainda, na Figura 3.1, as diversas interfaces disponíveis, tanto para as PABX com entrada E1 (2 Mb/s), ainda com tecnologia TDM, como para acesso a internet banda larga em Ethernet.

### 3.1.2 Descrição do projeto

O principal objetivo do projeto GPON – Embratel foi substituir a rede metálica hoje em operação. Essa rede utiliza a tecnologia x DSL, e nela são atendidos, no máximo, 250 usuários, limitados à taxa de 2 Mb/s e a uma distância máxima de 3 km da central, de forma a garantir

uma taxa de erro melhor que  $10^{-10}$ . Nessa configuração de rede, é necessário concatenar vários circuitos de 2 Mb/s para atender a um determinado usuário com requisito de maior capacidade, como o caso do serviço de internet de banda larga. Esse procedimento, além de utilizar uma maior quantidade de equipamentos por usuário, apresenta degradações decorrentes de problema de sincronismo de relógio, tema amplamente abordado na literatura especializada [JDSU, 2012].

Em sua fase inicial de implantação, o projeto adotou um perfil bastante conservador: considerou um comprimento de enlace (distância entre a OLT e a ONT) em torno de 10 km e taxas de transmissão por usuário (em cada ONT) limitadas a uma porta E1 (2 Mb/s) e uma porta Ethernet (10/100 Mb/s). A intenção foi garantir que o orçamento de potência do enlace apresentasse uma boa margem de segurança, considerando eventuais atenuações devido à degradação da rede óptica e a necessidade de inserção de divisores de potência/sinal para atendimento a novos usuários.

Na direção descendente, voz e dados são combinados e enviados no comprimento de onda de 1490 nm; na direção ascendente, o tráfego é feito em 1310 nm. Nessa etapa do projeto, o tráfego de vídeo na direção descendente (comprimento de onda de 1550 nm) não foi disponibilizado. Entretanto, essa aplicação poderá ser facilmente implantada, através da inclusão de um combinador/divisor e dos equipamentos de vídeo propriamente ditos, sem a necessidade de paralisação dos sistemas em funcionamento. Caso esta opção não seja implantada, as aplicações de vídeo podem ser disponibilizadas utilizando a tecnologia IPTV (Internet Protocol Television), a qual agrupa os bytes em pacotes de tamanho variável, e os transmite em fluxos conhecidos como *streaming* de vídeo, em conjunto com os bytes do tráfego de dados e voz digitalizada. Todavia, essa técnica demanda uma parcela significativa da taxa de transmissão disponível intrínseco ao processo de digitalização de imagem em movimento, além das degradações decorrentes da compressão do sinal de imagem e da eventual perda ou descarte de pacotes.

O projeto da rede óptica externa (ODN) e a escolha dos equipamentos eletrônicos associados (OLT/ONTs) merecem atenção, pois deles dependem, fundamentalmente, o alcance e a largura de banda de uma rede PON. Dois aspectos se destacam: o primeiro está relacionado ao orçamento de potência óptica disponível, que depende dos transceptores usados na OLT e ONTs e da perda total no enlace (incluindo fibras e divisores). O segundo se refere ao compartilhamento da infraestrutura física (OLT e fibras) e da largura de banda total do sistema

entre as várias ONTs, o que limita o número máximo de assinantes, de modo a assegurar adequada vazão (*throughput*).

Esse projeto deve também levar em conta a infraestrutura de cabos ópticos existente. São duas opções: redes aéreas e redes subterrâneas. Em média, as redes aéreas apresentam custos de instalação 30% menores que as redes subterrâneas; entretanto, são vulneráveis às intempéries, naturais ou provocadas, por exemplo, pela queda de postes, com o consequente rompimento do cabo, ou ainda as decorrentes de roubos de cabos, que, na região do Grande Rio, constituem um elevado índice. Os cabos instalados em dutos subterrâneos apresentam maior segurança, pois estão abrigados em galerias com acesso restrito às operadoras.

A rede ODN da Embratel faz uso preferencialmente de cabos aéreos para atendimento às pequenas e médias empresas, que operam com um tráfego médio (em capacidade e volume). Nos casos onde se exige um serviço com maior disponibilidade, é recomendada a construção do acesso com duas abordagens por caminhos absolutamente diferentes, garantindo, assim, a continuidade em caso de falhas simples, ou seja, somente um dos caminhos é afetado no evento.

A Figura 3.25 ilustra uma das possíveis configurações para a rede de distribuição (ODN) utilizada no projeto. Observam-se: os cabos-tronco, os cabos de abordagem, a caixa de emenda, contendo os divisores de potência (*splitters* simétricos e assimétricos), bem como os cabos derivados (cabos drop), comumente conhecidos como “rabichos”, que são limitados a uma distância de até 500 m a partir do último divisor da sequência.

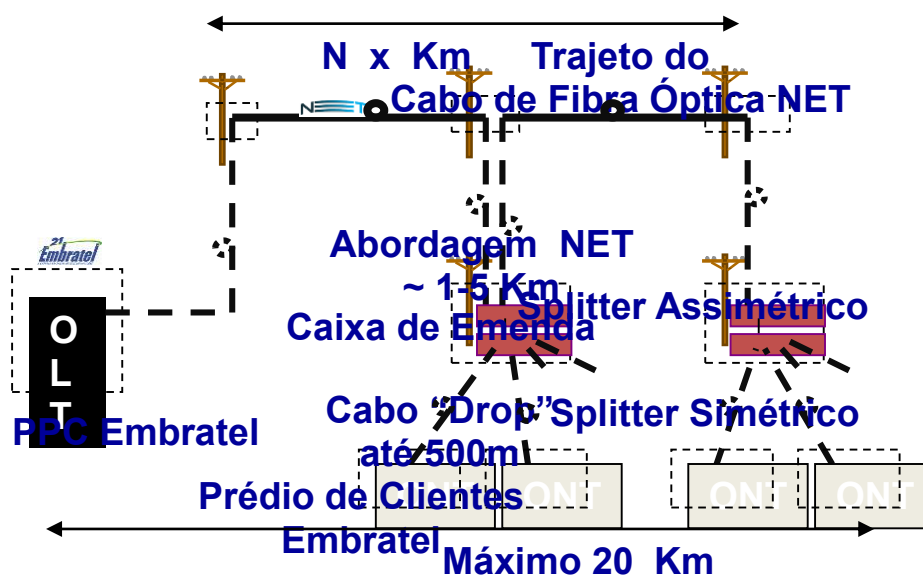


Figura 3.2: Exemplo de configuração de rede ODN adotada no projeto GPON – Embratel

Fonte: Embratel



Como comentado anteriormente, um aspecto importante no projeto da ODN é o orçamento de potência, que estabelece a máxima atenuação que o sinal pode sofrer desde o transmissor até o receptor, de forma a assegurar uma taxa de BER (melhor que  $10^{-10}$ ), considerando todas as degradações sofridas pelo sinal. Claramente, o orçamento de potência depende da distância entre a OLT e as diversas ONTs, mas também da configuração adotada para os divisores de potência.

De forma a tornar o projeto mais flexível e garantir que todos os usuários recebam o mesmo nível de potência, independentemente da sua distância à operadora, é comum o uso de divisores de potência simétricos e/ou assimétricos de 2 a 32 portas de saída, que possuem diferentes valores de atenuação e perda de inserção, conforme pode ser visto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros dos divisores de potência

| Características              | Banda passante de 1260 a 1360 e 1480 a 1580nm |     |      |      |      | Banda passante de 1260 a 1360 e 1480 a 1580nm |       |       |       |       |
|------------------------------|-----------------------------------------------|-----|------|------|------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                              | 1:2                                           | 1:4 | 1:8  | 1:16 | 1:32 | 1/99                                          | 10/90 | 20/80 | 30/70 | 40/60 |
| Perda de inserção máxima(db) | 3.7                                           | 7.3 | 10.5 | 13.7 | 17.1 | 21.60                                         | 11    | 7.9   | 6     | 4.7   |
| Diretividade (db)            | > 55 db                                       |     |      |      |      |                                               |       |       |       |       |
| Perda de retorno(db)         | > 55 db                                       |     |      |      |      |                                               |       |       |       |       |

Fonte:Furukawa

Os divisores de potência de 2, 4 e 8 portas são os mais típicos, e foram utilizados no projeto da Embratel, como pode ser observado na Figura 3.2.

Duas importantes fontes de atenuação na ODN são aquelas causadas pelos processos de emenda e conexão óptica. Nesse sentido, o projeto também deverá definir se as conexões dos cabos ópticos em geral serão feitas através de conectores ópticos ou através de fusão dos cabos ópticos nas próprias caixas de emendas. Os conectores ópticos são mais flexíveis, mas apresentam elevada atenuação, devido principalmente a procedimentos errôneos de instalação e recuperação. Por outro lado, as emendas ópticas são absolutamente robustas, apresentam baixa perda e baixa probabilidade de falha. Entretanto, caso seja necessário qualquer tipo de alteração, reconexão, ampliação etc., será necessária a utilização de máquina de fusão pelas equipes externas, o que aumenta substancialmente o custo da operação do sistema.

Do exposto anteriormente, muitos são os fatores que influenciam o orçamento de potência de um enlace óptico, e a análise deve ser feita caso a caso. Usualmente, fabricantes e fornecedores de equipamentos disponibilizam ferramentas computacionais específicas (*softwares*), que incluem extensas bibliotecas de componentes e permitem a realização dos

cálculos para diferentes cenários de investigação. Entretanto, a permissão de uso dessas ferramentas é restrita, sendo considerada uma informação estratégica, razão pela qual não é apresentada em detalhes no presente estudo.

Para exemplificar o emprego de uma dessas ferramentas, a Figura 3.3 mostra uma configuração de divisores de potência em uma rede ODN na cidade do Rio de Janeiro, classificada em seis áreas de cobertura. São utilizados divisores de potência simétricos e assimétricos (com razões de 85%, 80%, 70% e 60%), OLTs ZTE modelo ZXA10-C210 e ONT's ZTE modelo F631. As áreas mais próximas da OLT são atendidas por divisores assimétricos de maior razão e as áreas mais distantes são atendidas por divisores simétricos, possibilitando que os diversos ramos recebam níveis de potência semelhantes.

Cabe ressaltar que a classificação em áreas não é função apenas da distância à OLT, mas também do número de usuários a atender. O eficiente planejamento dos divisores de potência depende das demandas real e projetada para os clientes, considerando o potencial de crescimento da área em questão, bem como a necessidade de migração de acessos originalmente instalados usando a rede metálica.

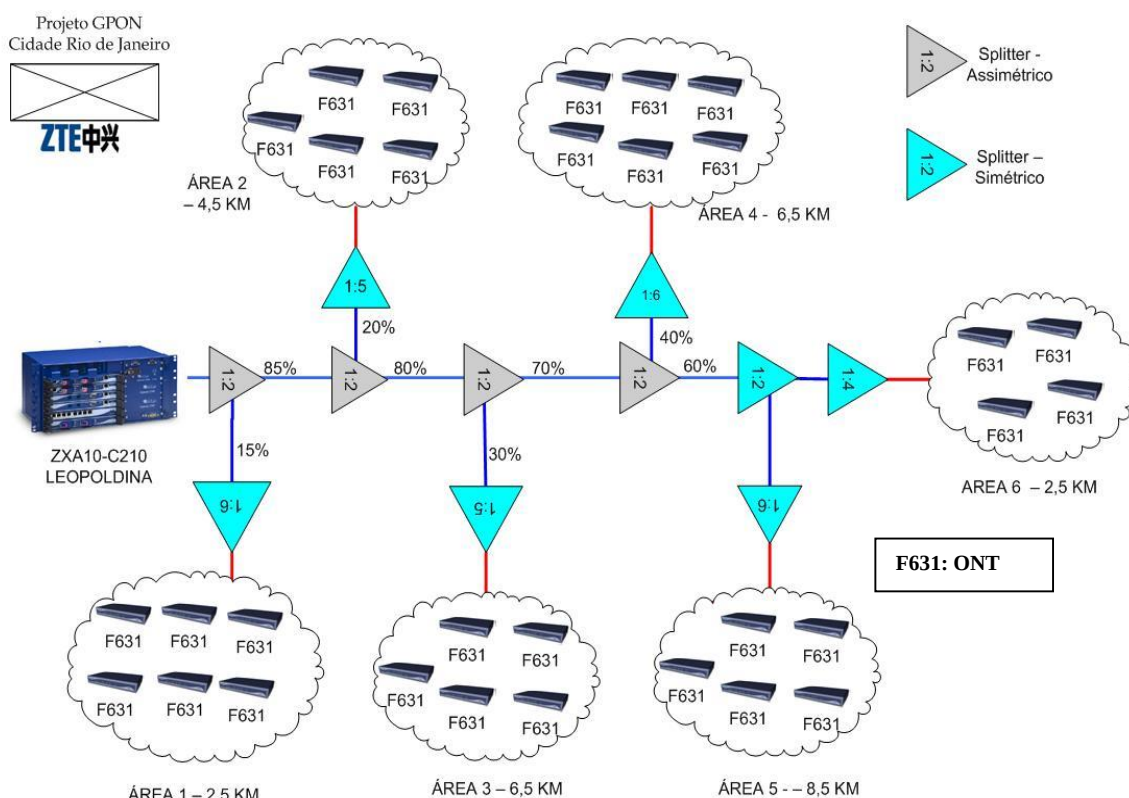


Figura 3.3: Distribuição de divisores de potência em uma rede ODN na cidade do Rio de Janeiro  
Fonte: Embratel

Após a determinação das distâncias máximas permitidas para cada ramo da rede, em função dos parâmetros estabelecidos, dos quais destacamos a distância máxima do enlace, e o número máximo de usuários, é necessário se apontar no mapa geográfico, as áreas de cobertura.

Para os cálculos numéricos, utiliza-se uma ferramenta específica, inicialmente criada por um dos fornecedores e aperfeiçoada pelo pessoal da Embratel, que, na verdade, é uma planilha eletrônica automatizada, ou seja, além das operações aritméticas convencionais, é capaz de realizar diversas operações lógicas, bem como importar dados de outras planilhas.

Para a parte gráfica, utiliza-se o aplicativo MAPINFO, indicado anteriormente, que permite que as demandas apontadas pela área de negócios sejam plotadas nos mapas, a partir do conhecimento dos endereços dos potenciais usuários.

O uso combinado das duas ferramentas permite o dimensionamento do projeto de forma manual, pois são necessárias inúmeras simulações, em cada uma das ferramentas, até que se obtenha a melhor alternativa.

Desta forma, estão sendo desenvolvidos na Embratel novos sistemas que visam automatizar procedimento, bem como disponibilizar relatórios gráficos que possam ser apresentados em camadas superpostas, permitindo análises de integração entre as redes.

Assim, encontra-se em análise, um sistema desenvolvido pelo CPQD denominado GAIA, ainda indisponível ao público, que possui interface com o MAPINFO, tornando possível a visualização em camadas de vários mapas superpostos, de acordo com necessidade de correlação dos dados disponíveis.

Tem-se ainda em estudo para aplicação também na rede GPON, o sistema desenvolvido pelo CPQD, denominado SAGRE (Sistema Automatizado de Gerencia de Rede Externa), até então usado para a gerência da planta óptica associada aos sistemas WDM/SDH, com a implementação de novos processamentos que permitam a manipulação dos parâmetros relativos ao orçamento de potência.

A Figura 3.4 apresenta o projeto gráfico de uma determinada rede no Rio de Janeiro, desenvolvido no MAPINFO, onde os círculos ilustrados representam as áreas máximas de cobertura obtidas das planilhas de cálculo e que foram inseridos manualmente no desenho.

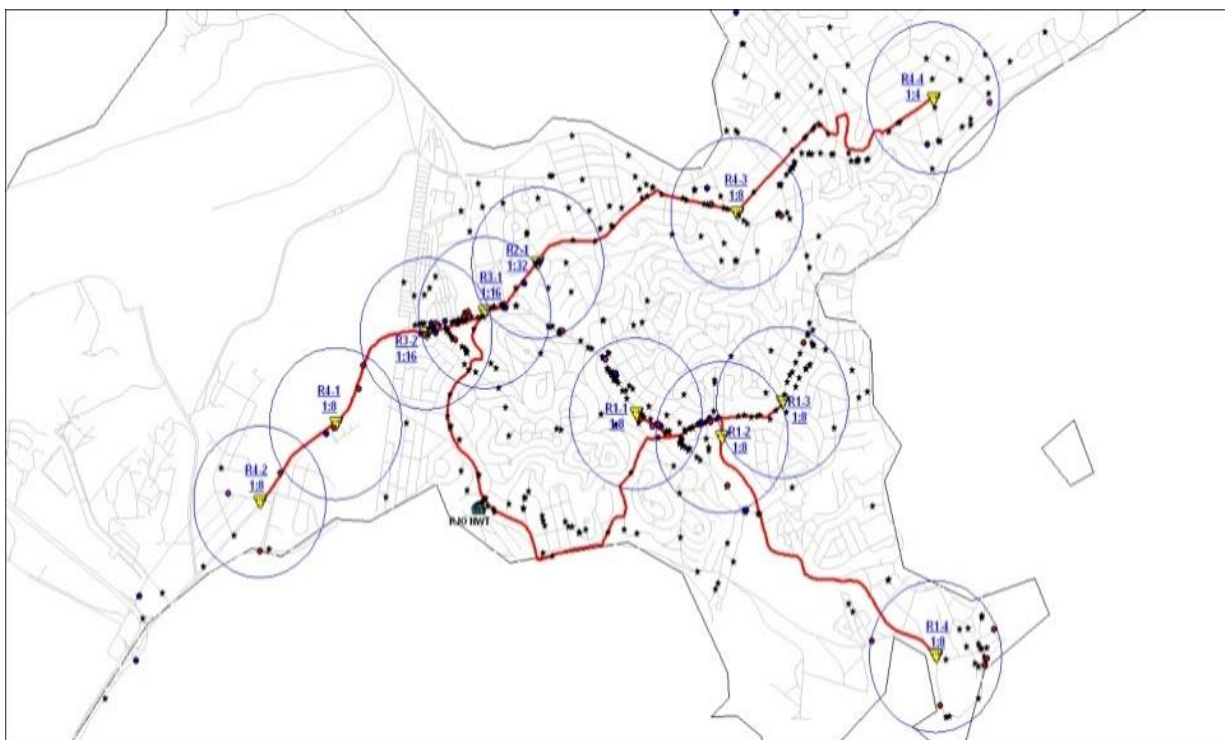


Figura 3.4: Exemplo do uso da ferramenta para representação gráfica dos elementos da rede

Fonte:

### 3.1.3 Parâmetros de teste usados no projeto

O desempenho da rede GPON – Embratel foi avaliada através de testes de campo realizados durante a fase de implantação do projeto, levando em conta as especificações constantes da recomendação ITU-T G.984, bem como contribuições do FSAN e dos próprios fabricantes dos equipamentos.

Visando a apresentação e comentários dos testes, os principais parâmetros indicados na recomendação ITU-T G.984.1 estão listados na Tabela 3.5. É importante ressaltar que cabe à operadora definir os valores dos parâmetros compatíveis com a aplicação do projeto. Os critérios adotados nessa escolha estão pautados em aspectos técnicos, econômicos e na estratégia da operadora relativa à capacidade e a abrangência dos seus demais serviços.

Tabela 3.2: Principais parâmetros da recomendação ITU-T G.984.1

| Parâmetro | Características |
|-----------|-----------------|
|-----------|-----------------|

|                                                  |                                             |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Taxas de descendente lado WAN (ODN)              | 2.488 / 1.244 Mb/s                          |
| Taxas de <i>uplink</i> permitidas lado WAN (ODN) | 2.488/1.244/622/155 Mb/s                    |
| Técnica de multiplexação/múltiplo acesso         | TDM / TDMA                                  |
| Distância máxima do enlace (cada tronco)         | 20 km                                       |
| Taxa de erro de bit (BER)                        | Melhor que $10^{-10}$                       |
| Precisão de clock                                | Stratum-1 ( $1 \times 10^{-11}$ )           |
| Código de linha                                  | NRZ (Não Retorna a Zero)                    |
| Faixa de atenuação (classes A/B/C)               | 5-20/10-25/15-30 dB                         |
| Potência máxima do OLT (classes A/B/C)           | + 4/+9/+12 dBm p/2.488 Mb/s                 |
| Potência máxima do ONT (classes A/B/C)           | +2/+3/+7 dBm p/ 1.244 Mb/s                  |
| Sensibilidade mínima da OLT (classes A/B/C)      | -21/-21/-28 dBm p/2.488 Mb/s                |
| Sensibilidade mínima da ONT (classes A/B/C)      | -24/-28/-29 dBm p/1.244 Mb/s                |
| Razão de extinção                                | Maior que 10 dB                             |
| Diagrama de olho                                 | 0,2 UI ( $\Delta x$ ); 0,25 (Y1); 0,75 (y2) |
| Tolerância com potência refletida                | Menor que 10 dB                             |
| Tolerância de <i>jitter</i>                      | 0,075/0,75 p/ ft = 1 MHz e Fo= 100 KHz      |
| Bytes de overhead                                | 24(2488M);12( 1244M);8(622); 4 (155)        |
| Retardo mínimo                                   | 120 ms                                      |
| Razão de divisão (split ratio)                   | 1:64 (1:128 em avaliação)                   |

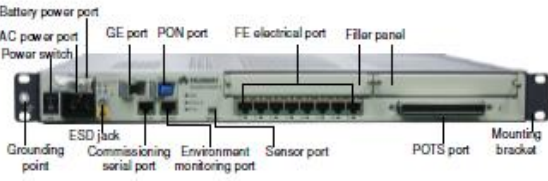
Fonte: ITU-T

A configuração física da OLT e das ONTs e suas características básicas estão sumarizadas nas Tabelas 3.3 e 3.4 respectivamente.

Tabela 3.3: Configuração física e especificação básica da OLT

| Parâmetro                                                                           | Características                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Orçamento de potência                                                               | 28 dBm ( classe B+)               |
| Placa de interface de uplink/downlink                                               | STM-1; 16 x E1;                   |
| Placa de interface ODN                                                              | 4 interfaces GPON                 |
| Capacidade total por bastidor                                                       | até 2560 ONT                      |
| T-CONT por porta GPON                                                               | 1 K                               |
| GEM por porta GPON                                                                  | 4 K                               |
| Placa de interface ODN                                                              | 4 interfaces GPON                 |
|  | <b>Características mecânicas:</b> |
|                                                                                     | Dimensões: 5U x 19"               |
|                                                                                     | Peso: 3,5 Kg                      |
|                                                                                     | Alimentação/Consumo: 48 VDC       |

Tabela 3.4: Configuração física e especificação básica da ONT

| Parâmetro                                                                                                                       | Características                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Interface lado ODN                                                                                                              | 2.4 descendente ; 1.2 ascendente                                                                                |
| Interface lado usuário                                                                                                          | FETH ; E1                                                                                                       |
| Característica porta Feth                                                                                                       | 10/100/1000 Mb/s (auto negociação )                                                                             |
| Característica porta E1                                                                                                         | 4 x 2 Mb/s ( G 703)                                                                                             |
| Máxima potência de transmissão                                                                                                  | + 5 dBm                                                                                                         |
| Sensibilidade porta dados                                                                                                       | - 29 dBm                                                                                                        |
| Placa de interface ODN                                                                                                          | 4 interfaces GPON                                                                                               |
| Sensibilidade porta CATV                                                                                                        | - 6 dBm                                                                                                         |
|  <p>MA5612 (AC + backup power + POTS port)</p> | <b>Características mecânicas</b><br>Dimensões: 1 UR x 19 “<br>Peso: 1,2 Kg<br>Alimentação/Consumo: 90 – 220 VAC |

Fonte: ZTE

A Tabela 3.5 apresenta as especificações e características estabelecidas para o desenvolvimento do projeto GPON – Embratel, de acordo com as normas constantes das recomendações ITU-T.

Tabela 3.5: Especificações e características estabelecidas para o projeto GPON – Embratel

| Parâmetro                                | Características                                  |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Padronização adotada                     | ITU-T G984                                       |
| Composição da OLT/ONT                    | Vide Tabelas 3.3 e 3.4                           |
| Composição da ODN                        | Rede estrela                                     |
| Taxa de descendente lado WAN (ODN)       | 2,488 Gbp/s                                      |
| Taxa de <i>uplink</i> lado WAN (ODN)     | 1,244 Gbp/s                                      |
| Interface de rede local lado LAN         | 2 Mb/s (G703); Nx64 K(V.35); Nx2M(FETH)-elétrico |
| Interface de acesso (lado WAN)           | Óptica bidirecional                              |
| Comprimentos de onda utilizados          | 1490 nm (down); 1310 nm (up)                     |
| Fibra                                    | SMF (bidirecional)                               |
| Número máximo de usuários p/ramo PON     | 32                                               |
| Distância máxima do enlace (cada tronco) | 10 km                                            |
| Distância máxima do “rabicho”            | 2 km                                             |
| Capacidade máxima por usuário            | 100 Mb/s                                         |

Fonte: Embratel

Acredita-se que a capacidade anterior, tanto aquela referente à máxima taxa de transmissão, quanto a que se refere ao número de usuários por fibra, deverá sofrer um upgrade em breve, quando da migração ou para uma rede 10 GPON ou para outra tecnologia /configuração, por exemplo, WPON.

No caso da migração para 10 GPON, serão necessárias modificações na interface óptica da OLT e das ONTs. Já para a tecnologia WPON, será necessária a introdução de novos elementos na rede, em particular de um divisor de potência passivo para viabilizar a efetiva combinação das duas redes, através de uma mesma rede externa (ODN).

### 3.1.4 Testes de campo realizados

Para avaliar o desempenho da rede, foram realizados os clássicos testes de: 1) vazão (*throughput*), que estabelece a relação entre a taxa enviada e a taxa efetivamente recebida; 2) latência (RTD – *Round Trip Delay*), que estabelece a relação entre a taxa enviada e o atraso de ida e volta das mensagens; 3) perda de quadros (*frame loss*), que estabelece a relação entre a taxa enviada e a taxa de perda de pacotes.

As condições adotadas para a realização dos testes estão sumarizadas na Tabela 3.6, e incluem: comprimento dos quadros encaminhados para a rede; duração dos testes de vazão, latência e perda de quadros; número de testes. Em todas as medidas, considerou-se uma taxa enviada fixa de 100 Mb/s. Os correspondentes resultados são mostrados na Tabela 3.10.

Tabela 3.6: Parâmetros utilizados na avaliação da arquitetura GPON – Embratel

| Parâmetro                                                               | Características                    |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Comprimento dos quadros (frame lengths)                                 | 64;128; 256; 512; 1024; 1280; 1518 |
| Precisão da medida de largura de banda (bandwidth measurement accuracy) | 1%                                 |
| Tolerância de perda de quadros (frame loss tolerance)                   | 0,00%                              |
| Duração do teste de vazão (throughput trial duration)                   | 60 segundos                        |
| Número de testes de latência RTD (number of latency RTD trials)         | 20                                 |
| Duração do teste de latência RTD (latency RTD trial duration)           | 120 segundos                       |
| Limiar de latência RTD (latency RTD pass threshold)                     | 1000 $\mu$ s                       |
| Número de testes fim-a-fim (number of back-to-back trials)              | 50                                 |
| Tempo máximo de teste fim-a-fim (back-to-back max trial time)           | 2 segundos                         |

Fonte: Planilha de testes da Embratel

**Tabela 3.7: Resultados dos testes da rede GPON – Embratel**

| Parâmetros de entrada          |                     | Medidas realizadas   |                            |                              |                       | Cálculos            |                      |             |              |
|--------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------|--------------|
| Comprimento do quadro ( bytes) | Taxa enviada (Mbps) | Taxa recebida (Mbps) | Taxa recebida (quadro/seg) | Perda de quadro (quadro/seg) | Latência ( micro seg) | Quadrs/seg enviados | Diferença de quadros | Diferença % | Vazão ( % )  |
| 64                             | 100.0               | 100.0                | 148810                     | 0                            | 600                   | 195312,50           | 46502,50             | 31,25       | 68,75        |
| 128                            | 100.0               | 100.0                | 84460                      | 0                            | 570                   | 97656,25            | 13196,25             | 15,62       | 84,38        |
| 256                            | 100.0               | 100.0                | 45290                      | 0                            | 577                   | 48828,13            | 3538,13              | 7,81        | 92,19        |
| 512                            | 100.0               | 100.0                | 23497                      | 0                            | 614                   | 24414,06            | 917,06               | 3,90        | 96,10        |
| 1024                           | 100.0               | 100.0                | 11974                      | 0                            | 689                   | 12207,03            | 233,03               | 1,95        | 98,05        |
| 1280                           | 100.0               | 100.0                | 9616                       | 0                            | 730                   | 9765,63             | 149,63               | 1,56        | 98,44        |
| 1518                           | 100.0               | 100.0                | 8128                       | 0                            | 763                   | 8234,52             | 106,52               | 1,31        | 98,69        |
| <b>Média</b>                   |                     |                      |                            | <b>0</b>                     | <b>649</b>            |                     |                      |             | <b>90,94</b> |

Fonte: Planilha de testes da Embratel

Os resultados apresentados na Tabela 3.7 são plenamente satisfatórios para as condições de teste estabelecidas. Obteve-se 100% de vazão para todos os tipos (comprimentos) de pacotes de dados enviados. O teste de latência indicou um valor médio de RTD de 649  $\mu$ s, absolutamente compatível com várias aplicações, inclusive aquelas que operam em tempo real, tais como sinais de voz e vídeo. Nesse tipo de aplicação, e apenas para fins comparativos, os codecs de vídeo que operam com baixo nível de compressão, como o JPEG 2000, apresentam um retardo de 80 ms. Os codecs mais usados atualmente operam com alto nível de compressão, pois utilizam processamentos extremamente complexos, e impõem um retardo da ordem de 300 ms, tornando ainda mais desprezível o RTD obtido. Também não ocorreu perda de quadros em nenhuma condição de teste, mesmo na condição extrema de elevada taxa de transmissão de quadros (148818 quadros/s) de pequeno comprimento (64 bytes).

Com relação à taxa de erro de bit (BER), o teste realizado apresentou um valor de  $10^{-10}$ , similar ao padrão de atendimento da maioria das redes metálicas convencionais, por exemplo, as redes DSL, e aos enlaces de micro-ondas e satélites, além de, naturalmente, atender as especificações ITU-T G. 984.1.

Além disso, graças à imunidade das redes ópticas a quaisquer tipos de ruído, não foi observada nos testes em campo degradação decorrente dos mesmos, principalmente o impulsivo, que normalmente ocasiona uma sequência de erro decorrente da degradação da relação sinal/ruído, como atualmente ocorre nas redes metálicas susceptíveis a interferências eletromagnéticas e *crosstalk*.



Conclui-se, portanto, que a rede GPON Embratel apresenta desempenho totalmente aderente às atuais necessidades de capacidade e qualidade para aplicações multimídia de banda larga, e é um meio de transmissão adequado para operar associada as redes de comutação por pacotes/células, das quais se destacam: redes com protocolo ATM que operam com células de 53 bytes, para tráfego de voz, dados e vídeo; redes com protocolo frame relay que operam com quadros de comprimento variáveis entre 262 e 1600 bytes, para tráfego de voz e dados; redes com protocolo IP que operam com pacotes de 1518 bytes, para tráfego de voz, dados e vídeo; redes com protocolo MPEG 2 que operam com quadros de 188 bytes, para tráfego de vídeo e áudio.

O problema da escalabilidade abordada anteriormente está sendo estudado pelos fornecedores e, nesse momento, já existe a possibilidade de adoção do quadro GPON para 10 GPON. Nessa situação, todas as placas de interface do lado da rede do *backbone* são mantidas, sendo substituídas apenas as placas de controle, gerência e interface PON.

Pode ser levantada a questão da fragilidade da segurança da informação causada pelo fato de cada usuário receber, na camada física, o sinal de todos os outros usuários daquele ramo da rede em diferentes slots de tempo. Essa aparente fragilidade é contornada pela adoção de um sistema de criptografia bastante eficiente, além da segregação garantida pela adoção da recomendação ITU-T G.984. 3 – *Transmission Convergence*, que é equivalente à camada 2 do modelo OSI.

### **3.1.5 Análise de custos GPON vs Soluções atuais**

Um fator muito importante em um projeto são os custos de investimento (CAPEX) e de operação (OPEX) associados. Em particular, a viabilidade econômica de uma nova tecnologia e, conseqüentemente, a decisão de implantação dessa solução dependem de uma análise comparativa com tecnologias competidoras. Em adição, as propostas de fornecedores / fabricantes de equipamentos são analisadas tecnicamente e incluem fatores tais como: desempenho, durabilidade, suporte e reposição de peças.

Esta seção apresenta uma análise comparativa de custos CAPEX e OPEX, considerando a nova solução GPON e outras três soluções alternativas já em uso para a rede de última milha: modem óptico + SHDSL; SDH NG + SHDSL; link de micro-ondas; link de satélite. O estudo

é baseado em uma concepção hipotética dessas quatro soluções, apenas para exemplificar, e que estão ilustradas na Figura 3.5.

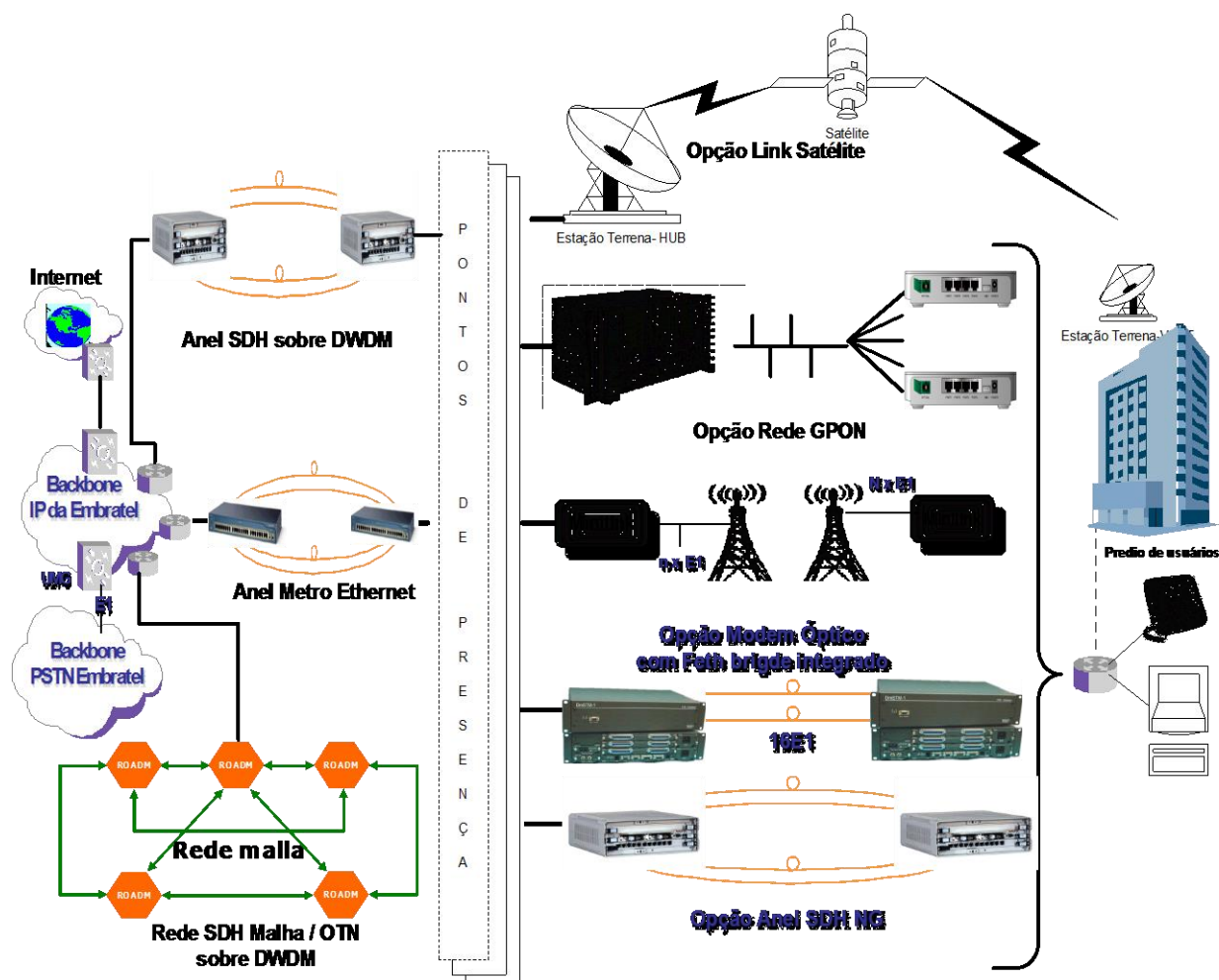


Figura 3.5: Soluções para a rede de última milha: modem óptico + SHDSL; SDH NG + SHDSL; link de micro-ondas; link de satélite

As redes de transporte e acesso têm as seguintes características:

a) Redes de Transporte;

– Enlace via satélite: terminal remoto (VSAT) na própria dependência do usuário, interligado ao *backbone* através de uma estação concentradora (hub). Nessa configuração, a rede de acesso de última milha também é contemplada;

– Anel SDH sobre DWDM: equipamentos SDH de alta hierarquia, interligados aos pontos de presença/ estações secundárias através de sistemas DWDM em anel;

- Anel Metro-Ethernet: composto por *switchs* nível 3 (que possuem características de roteamento); interligação por sistemas ópticos em malha;
- Rede SDH/OTN interligada a sistemas DWDM em malha.
- b) Redes de Acesso;
- GPON: composta pela OLT, ODT, ONT;
- Link de micro-ondas utilizando rádios mini-link com interfaces ethernet;
- FTTH ponto a ponto, com acesso através de modem óptico e modem SHDSL para atender aos últimos 2 km;
- Anel SDH NG com interface ethernet;

As interfaces de interconexão entre as redes de transporte e acesso que ocorrem nos pontos de presença (PoPs) utilizam as hierarquias SDH (STM 1 a 16), exceto a opção metro-Ethernet, cuja interface é GETH. Para a interface da rede de acesso com o usuário, utiliza-se FETH. Assim, as aplicações de telefonia e dados devem considerar tal condição, ou seja, compatibilizar-se com telefones VoIP, PABX IP, *switchs* L2L com segregação de tráfego dentre outras.

Para garantir uniformidade na análise das topologias, considera-se que os potenciais usuários estão localizados em prédios comerciais e/ou condomínios planos, e os serviços de voz e dados oferecidos têm as características indicadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Requisitos para atendimento de usuários

| Parâmetro                           | Características                                |
|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| Pontos de atendimento de usuários   | 8 sites em um raio de 20 km c/16 pontos cada   |
| Capacidade de cada ponto de usuário | 12 Mb/s (10 Mb/s dados e 2 Mb/s voz)           |
| Serviço de voz                      | 30 troncos analógicos (TDM) ou 200 ramais VoIP |
| Serviço de dados                    | 10 Mb/s (L2L + Internet banda larga)           |

Fonte: Embratel

A Tabela 3.9 apresenta uma comparação de custos CAPEX e OPEX, considerando as soluções de última milha: GPON; modem óptico + SHDSL; SDH NG + SHDSL; link de micro-

ondas; link de satélite. Os diversos equipamentos associados a cada tecnologia são listados na planilha.

Tabela 3.9: Tabela comparativa de custos: GPON e tecnologias alternativas para a última milha

| Equipamentos                        | Preços de lista |         | GPON  |                         | Modem optico+ SHDSL |                          | SDH NG + SHDSL |                         | Link microondas |                         | Link Satelite |                          |
|-------------------------------------|-----------------|---------|-------|-------------------------|---------------------|--------------------------|----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|---------------|--------------------------|
|                                     | R\$ unitario    | Unidade | Qtd   | R\$ total               | Qtd                 | R\$ unitario             | Qtd            | R\$ unitario            | Qtd             | R\$ unitario            | Qtd           | R\$ unitario             |
| OLT p/128 sites e 4 GPON            | R\$ 13.000,00   | Unidade | 1     | R\$ 13.000,00           | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| ONT p/4 x E1; 4 eth; 1 x GPON       | R\$ 2.500,00    | Unidade | 128   | R\$ 320.000,00          | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Cabo optico 36 fibras               | R\$ 10,00       | mt      | 0     | R\$ -                   | 320000              | R\$ 3.200.000,00         | 20000          | R\$ 200.000,00          | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Cabo optico 12 fibras               | R\$ 4,00        | mt      | 26400 | R\$ 105.600,00          | 0                   | R\$ -                    | 800            | R\$ 3.200,00            | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Divisores opticos 1:2               | R\$ 30,00       | Unidade | 12    | R\$ 360,00              | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Divisores opticos 1:16              | R\$ 80,00       | Unidade | 12    | R\$ 960,00              | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| DGC's ( modulos de 24 fibras )      | R\$ 550,00      | Unidade | 5     | R\$ 2.750,00            | 1                   | R\$ 550,00               | 9              | R\$ 4.950,00            | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Caixas de emenda optica             | R\$ 320,00      | Unidade | 2     | R\$ 640,00              | 2                   | R\$ 640,00               | 9              | R\$ 2.880,00            | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Modem optico 16 x E1                | R\$ 1.300,00    | Unidade | 0     | R\$ -                   | 8                   | R\$ 10.400,00            | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| CPE E1/ETH ( roteador )             | R\$ 3.500,00    | Unidade | 128   | R\$ 448.000,00          | 128                 | R\$ 448.000,00           | 128            | R\$ 448.000,00          | 128             | R\$ 448.000,00          | 128           | R\$ 448.000,00           |
| MUX SDH NG ( 16 E1 e 8 Eth )        | R\$ 8.000,00    | Unidade | 0     | R\$ -                   | 0                   | R\$ -                    | 16             | R\$ 128.000,00          | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Modens SHDSL                        | R\$ 620,00      | Unidade | 0     | R\$ -                   | 1536                | R\$ 952.320,00           | 256            | R\$ 158.720,00          | 256             | R\$ 158.720,00          | 0             | R\$ -                    |
| Cabo metalico 40 pares              | R\$ 2,00        | mt      | 0     | R\$ -                   | 256000              | R\$ 512.000,00           | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Cabo metalico 4 pares               | R\$ 1,00        | mt      | 0     | R\$ -                   |                     | R\$ -                    | 1600           | R\$ 1.600,00            | 19200           | R\$ 19.200,00           | 0             | R\$ -                    |
| Cabo coaxial                        | R\$ 4,00        | mt      | 0     | R\$ -                   | 0                   | R\$ -                    | 0              |                         | 12800           | R\$ 51.200,00           | 12800         | R\$ 51.200,00            |
| Conversor E1/ETH                    | R\$ 600,00      | Unidade | 0     | R\$ -                   | 128                 | R\$ 76.800,00            | 16             | R\$ 9.600,00            | 128             | R\$ 76.800,00           | 128           | R\$ 76.800,00            |
| Rádio 16 x E1 ( 1+1 )               | R\$ 65.000,00   | Unidade | 0     | R\$ -                   | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 8               | R\$ 520.000,00          | 0             | R\$ -                    |
| Rádio 155M                          | R\$ 180.000,00  | Unidade | 0     | R\$ -                   | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Rádio 63 x E1                       | R\$ 280.000,00  | Unidade | 0     | R\$ -                   | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Infra ( antena,torre; ferragens...) | R\$ 15.000,00   | Unidade | 0     | R\$ -                   | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 8               | R\$ 120.000,00          | 8             | R\$ 120.000,00           |
| Estação Vsat p/ 4 x E1; 4 eth       | R\$ 15.000,00   |         | 0     | R\$ -                   | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 8             | R\$ 120.000,00           |
| Implantação cabo optico sustentado  | R\$ 10,00       | mt      | 26400 | R\$ 264.000,00          | 320000              | R\$ 3.200.000,00         | 20000          | R\$ 200.000,00          | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Implantação cabo metalico cordoalha | R\$ 13,00       | mt      | 0     | R\$ -                   | 256000              | R\$ 3.328.000,00         | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Implantação cabo metalico interno   | R\$ 2,60        | mt      | 0     | R\$ -                   | 0                   | R\$ -                    | 1600           | R\$ 4.160,00            | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Implantação cabo coaxial interno    | R\$ 13,00       | mt      | 0     | R\$ -                   | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 0             | R\$ -                    |
| Aluguel transponder satellite       | R\$ 5.600,00    | mhz     | 0     | R\$ -                   | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 0               | R\$ -                   | 2048          | R\$ 11.468.800,00        |
| Licença Anatel                      | R\$ 5.000,00    | ano     | 0     | R\$ -                   | 0                   | R\$ -                    | 0              | R\$ -                   | 1               | R\$ 5.000,00            | 0             | R\$ -                    |
| Aluguel/adequação do PPC (rateado)  | R\$ 8.000,00    | UR      | 8     | R\$ 64.000,00           | 64                  | R\$ 512.000,00           | 64             | R\$ 512.000,00          | 48              | R\$ 384.000,00          | 0             | R\$ -                    |
| <b>Total</b>                        |                 |         |       | <b>R\$ 1.219.310,00</b> |                     | <b>R\$ 12.240.710,00</b> |                | <b>R\$ 1.673.110,00</b> |                 | <b>R\$ 1.782.920,00</b> |               | <b>R\$ 12.284.800,00</b> |

Fonte: Fabricantes diversos

Observa-se que a solução GPON se mostra muito interessante também sob o ponto de vista do custo do investimento, quando comparada às demais alternativas indicadas na Tabela 3.9 , constatando-se um custo ligeiramente menor do que as tecnologias SDH NG + SHDSL e o enlace de micro-ondas, entretanto representando apenas 10% do custo associado à implantação das alternativas do modem óptico + SHDSL e do enlace satélite.

Outro fator relevante é a sua escalabilidade, uma vez que a OLT permite expansão apenas com a adição de novas placas ópticas de saída, considerando que o cabo tronco considerado já contempla as fibras necessárias.

Todas as alternativas necessitam de um investimento bem maior para aumento da capacidade instalada, principalmente ao se considerar os sistemas de transmissão pelo ar, (micro-ondas/satélite), onde a limitação de banda no espectro de frequência é bastante efetiva.

No caso dos sistemas em fibra, a despeito da proximidade dos custos de implantação apresentados, há de se considerar também a escalabilidade, uma vez que a hierarquia SDH está limitada a 10 Gbp/s, enquanto a solução metro ethernet não se mostra atrativa para aplicações que envolvem o tráfego do tipo determinístico, principalmente aquele associado à transmissão de sinais de vídeo de qualidade.

Assim, pode-se concluir a excelente relação custo-benefício da solução GPON frente às demais opções disponíveis atualmente no mercado, razão pela qual acredita-se em um rápido crescimento.

### 3.2 SIMULAÇÕES

Em atendimento ao objetivo do presente trabalho quanto à avaliação das redes PON e suas variantes, e após o estudo anterior da rede GPON implantada no campo, este tópico irá avaliar as redes WPON, OCDMA PON e a rede híbrida GPON/WPON, através de simulações desenvolvidas utilizando o aplicativo OptiSystem.

Essa ferramenta é utilizada em diversas aplicações na área de telecomunicações, possuindo vasta biblioteca de dispositivos e visualizadores, tanto no domínio elétrico quanto no óptico, podendo ser considerada para uso profissional, tal a sua versatilidade, abrangência e precisão, principalmente em suas versões mais recentes.

No Apêndice I, será apresentado um breve resumo das principais características deste aplicativo, entretanto informações mais detalhadas podem ser obtidas em [[www.optisystem.com](http://www.optisystem.com)].

Adicionalmente serão inseridos neste apêndice, os diagramas originais de cada um dos projetos, pois aqui serão apresentados os diagramas em bloco das topologias desenvolvidas, incluindo a visualização das principais medidas realizadas em cada ponto do sistema.

### 3.2.1 Simulação de uma Rede WPON

A topologia desenvolvida apresenta uma solução para tráfego bidirecional, simétrico, para atender oito usuários, conforme ilustra o diagrama em blocos na Figura 3.6.

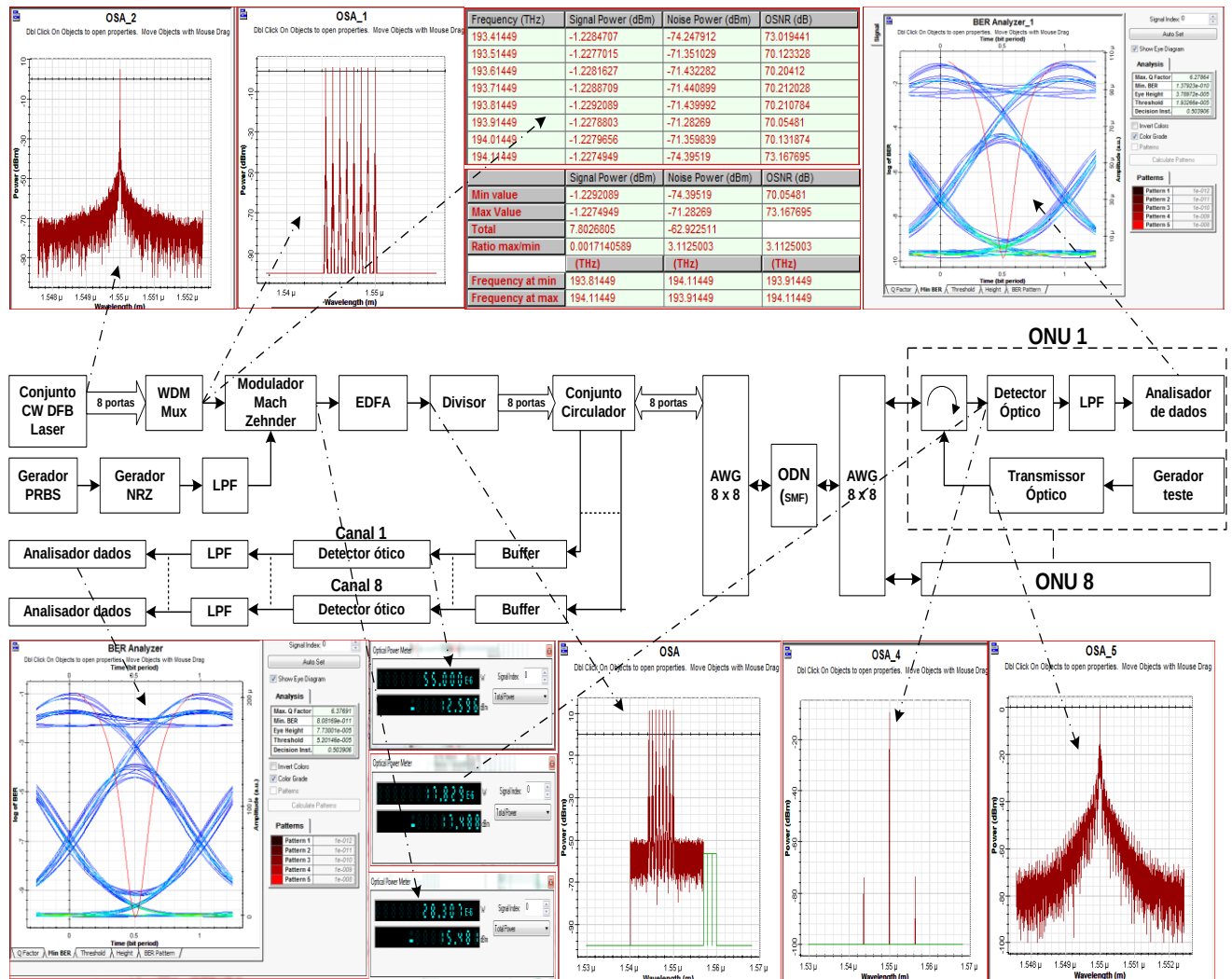


Figura 3.6: Topologia utilizada na simulação de uma rede WPON

#### 3.2.1.1 Descrição da Topologia e Funcionamento

No sentido de descendente, um conjunto de lasers do tipo DFB, produz as oito portadoras, espaçadas de 100 GHz, cada qual com uma potência de 0 dBm e comprimentos de onda variando de 1550 nm a 1544,4 nm (193,41 a 194,11 THz). As mesmas são multiplexadas no WDM Mux configurado para uma largura de banda de 10 GHz, sendo utilizadas como portadoras no modulador Mach-Zehnder [LIN C.H. et al,2005]. Um gerador de sequência pseudorandômica (PRBS) é usado para gerar o sinal digital de teste, complementado por um gerador de pulso NRZ e por um filtro passa-baixas (LPF) com função de Bessel. As várias

portadoras moduladas são amplificadas no amplificador óptico (EDFA), que provê um ganho de 17 dB, com uma figura de ruído de 6 dB, de forma a garantir uma boa relação  $C/N$  (*Carrier to noise*) das mesmas e, assim, não comprometer a taxa de BER.

Em seguida, o sinal é dividido no divisor passivo em oito sinais idênticos, de forma a serem encaminhada às portas do AWG, após passarem pelos circuladores que, além de evitarem reflexão de potência no sentido descendente, permitem o resgate do sinal ascendente proveniente das ONUs.

A despeito de o AWG possuir também 8 portas de saída, somente a primeira porta é utilizada, a qual contempla todas as portadoras encaminhadas à sua entrada, sendo as demais portas inibidas.

Para simular a rede ODN, foi inserida a fibra óptica do tipo SMF( *Single Mode Fiber*), com uma distância de 20 km e uma atenuação de 0,2 dB/km, desprezando-se as perdas nas emendas/conexões por serem baixas para a topologia idealizada.

O sinal que chega no lado da recepção é encaminhado diretamente para a porta 1 do AWG, que por sua vez fornece em suas 8 saídas, as portadoras associadas à transmissão. O receptor é constituído basicamente de um fotodetector, enquanto que para o transmissor foi utilizado da biblioteca existente um transmissor óptico que já incorpora o sinal modulante NRZ, e produz a portadora na frequência associada. A recepção desse sinal de ascendente, no lado da OLT, é realizada também com o uso do detector óptico (*photo-detector*).

Cada um desses componentes possui as suas próprias configurações, as quais são detalhadas nas Figuras 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13 a seguir:

| Label: PRBS Data                            |                          |                              |        |        | Label: CW DFB Laser Array ES                                |                        |       |       |        |
|---------------------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------|--------|-------------------------------------------------------------|------------------------|-------|-------|--------|
| Main Simulation Random numbers Custom order |                          |                              |        |        | Main Polarization Simulation Noise Random nu... Custom o... |                        |       |       |        |
| Disp                                        | Name                     | Value                        | Units  | Mode   | Disp                                                        | Name                   | Value | Units | Mode   |
| <input checked="" type="checkbox"/>         | Bit rate                 | 9.5e+009                     | Bits/s | Normal | <input checked="" type="checkbox"/>                         | Number of output ports | 8     |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>                    | Operation mode           | Order                        |        | Normal | <input checked="" type="checkbox"/>                         | Frequency              | 1550  | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/>                    | Order                    | log(Sequence length)/log( 5) |        | Script | <input checked="" type="checkbox"/>                         | Frequency spacing      | 100   | GHz   | Normal |
| <input type="checkbox"/>                    | Mark probability         | 0.5                          |        | Normal | <input checked="" type="checkbox"/>                         | Power                  | 5     | dBm   | Normal |
| <input type="checkbox"/>                    | Number of leading zeros  | 1                            |        | Normal | <input type="checkbox"/>                                    | Linewidth              | 10    | MHz   | Normal |
| <input type="checkbox"/>                    | Number of trailing zeros | 1                            |        | Normal | <input type="checkbox"/>                                    | Initial phase          | 0     | deg   | Normal |

Figura 3.7: Geração da sequência de teste PRBS e da portadora CW, respectivamente



Label: WDM PON

Simulation

Signals

Spatial effects

Noise

Signal tracing

| Name               | Value                               | Units  | Mode   |
|--------------------|-------------------------------------|--------|--------|
| Simulation window  | Set bit rate                        |        | Normal |
| Reference bit rate | <input checked="" type="checkbox"/> |        | Normal |
| Bit rate           | 9.5e+009                            | Bits/s | Normal |
| Time window        | 6.736842105263158e-009              | s      | Normal |
| Sample rate        | 608e+009                            | Hz     | Normal |
| Sequence length    | 64                                  | Bits   | Normal |
| Samples per bit    | 64                                  |        | Normal |
| Number of samples  | 4096                                |        | Normal |
| Cuda GPU           | <input type="checkbox"/>            |        | Normal |

Label: WDM Mux ES

Main

Simulation

Noise

Custom order

| Disp                                | Name                  | Value  | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-----------------------|--------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/>            | Number of input ports | 8      |       | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency             | 1550   | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency spacing     | 100    | GHz   | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bandwidth             | 12     | GHz   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Insertion loss        | 3      | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Depth                 | 100    | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Filter type           | Bessel |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Filter order          | 4      |       | Normal |

Figura 3.8: Principais parâmetros da transmissão no sentido descendente

Label: Mach-Zehnder Modulator

Main

Simulation

Custom order

| Disp                     | Name                  | Value                    | Units | Mode   |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Extinction ratio      | 30                       | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Negative signal chirp | <input type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Symmetry factor       | -1                       |       | Normal |

Label: Power Splitter

Main

Custom order

| Disp                     | Name                   | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|------------------------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Number of output ports | 8     |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Loss                   | 6     | dB    | Normal |

Figura 3.9: Modulador e divisor da transmissão no sentido descendente

Label: Circulators

Image

Custom order

Circulator

| Disp                     | Name          | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|---------------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | InsertionLoss | 2     | dB    | Normal |

Label: Circulator

Main

Custom order

| Disp                     | Name           | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|----------------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Insertion loss | 2     | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Return loss    | 60    | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Isolation      | 60    | dB    | Normal |

Figura 3.10: Circuladores usados na transmissão e recepção

Label: Photodetector PIN\_1

Main

Downsampling

Noise

Random numbers

Custom order

| Disp                     | Name                  | Value                               | Units | Mode   |
|--------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Centered at max power | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Center frequency      | 193.1                               | THz   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Sample rate           | 5 * ( Sample rate )                 | Hz    | Script |

Main

Downsampling

Noise

Random numbers

Custom order

| Disp                     | Name         | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|--------------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Responsivity | 0.7   | A/W   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dark current | 10    | nA    | Normal |

Label: Photodetector PIN\_1

Main

Downsampling

Noise

Random numbers

Custom order

| Disp                     | Name                    | Value                               | Units | Mode   |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Noise calculation type  | Numerical                           |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add signal-ASE noise    | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add ASE-ASE noise       | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add thermal noise       | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Thermal noise           | 50e-024                             | W/Hz  | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add shot noise          | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Shot noise distribution | Gaussian                            |       | Normal |

Figura 3.11: Detectores utilizados nos sentidos descendente e ascendente, respectivamente

Label: SMF 1

Main

Dis...

PMD

No...

En...

Nu...

Gr...

Si...

N...

Ra...

Cu...

| Disp                                | Name                      | Value                               | Units | Mode   |
|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/>            | User defined reference w  | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Reference wavelength      | 1550                                | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Length                    | 20                                  | km    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation effect        | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation data type     | Constant                            |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation               | 0.2                                 | dB/km | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation vs. wavelengt | Attenuation dat                     |       | Normal |

Figura 3.12: Principais características do enlace óptico



Label: SMF 1

Main | Dis... | PMD | No... | En... | Nu... | Gr... | Si... | **N...** | Ra... | Cu...

| Disp                     | Name                   | Value                               | Units | Mode   |
|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Noise center frequency | 193.4                               | THz   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise bandwidth        | 20                                  | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise bins spacing     | 2                                   | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise threshold        | -100                                | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise dynamic          | 3                                   | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Convert noise bins     | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |

| Disp                     | Name                      | Value                               | Units                 | Mode   |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Group velocity dispersion | <input checked="" type="checkbox"/> |                       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Third-order dispersion    | <input checked="" type="checkbox"/> |                       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dispersion data type      | Constant                            |                       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Frequency domain param    | <input type="checkbox"/>            |                       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dispersion                | 16.75                               | ps/nm/km              | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dispersion slope          | 0.075                               | ps/nm <sup>2</sup> /k | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Beta 2                    | -20                                 | ps <sup>2</sup> /km   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Beta 3                    | 0                                   | ps <sup>3</sup> /km   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dispersion file format    | Dispersion vs. wavelength           |                       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dispersion file name      | Dispersion.dat                      |                       | Normal |

Label: SMF 1

Main | Dis... | PMD | **No...** | En... | Nu... | Gr... | Si... | N... | Ra... | Cu...

| Disp                     | Name                       | Value                    | Units             | Mode   |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Self-phase modulation      | <input type="checkbox"/> |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Cross-phase modulation     | <input type="checkbox"/> |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Effective area data type   | Constant                 |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Effective area             | 80                       | um <sup>2</sup>   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Effective area vs. wavelen | EffectiveAra.dat         |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | n2 data type               | Constant                 |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | n2                         | 26e-021                  | m <sup>2</sup> /W | Normal |
| <input type="checkbox"/> | n2 vs. wavelength          | n2.dat                   |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Raman scattering           | <input type="checkbox"/> |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Fract. Raman contribution  | 0.18                     |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Raman gain data type       | Calculate                |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Raman gain peak            | 100e-015                 |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Raman gain reference pu    | 1000                     | nm                | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Gain vs. wavelength        | RamanGain.dat            |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Polarization factor        | 2                        |                   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Temperature                | 300                      | K                 | Normal |

Figura 3.13: Características adicionais do enlace óptico

De forma a sintetizar as configurações adotadas, a Tabela 3.13 apresenta os principais parâmetros dos componentes usados na simulação.

Tabela 3.10: Principais parâmetros dos componentes usados na simulação WPON.

| Parâmetro                              | Componente                   |                                           | Valor                                               |
|----------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                                        | Funcionalidade               | Nomenclatura                              |                                                     |
| Frequencia de operação Downstream      | Laser Tx Downstream          | CW DFB Laser Array ES                     | 1550;1549.2;1548.4;1547.6;1546.8;1546;1545.2;1544.4 |
| Frequencia de operação upstram         | Laser TX Upstream            | Optical transmitter                       | 1550;1549.2;1548.4;1547.6;1546.8;1546;1545.2;1544.5 |
| Espaçamento das portadoras             | Lasers TX                    | CW DFB Laser Array ES/Optical transmitter | 100 Ghz                                             |
| Potência de saída Down / Upstream      | Lasers TX                    | CW DFB Laser Array ES/Optical transmitter | 5 dbm / 0 dbm                                       |
| Taxa de transmissão Down/Upstream      | Gerador teste                | PRBS Data/Optical transmitter             | 9.5 E -9 ( programado pelo script)                  |
| Comprimento da sequência               | Script dos parametros gerais | WDM PON                                   | 64 bits (programado pelo script )                   |
| Extinction ratio                       | Modulador                    | Mach-Zehnder modulator                    | 30 db                                               |
| Largura de banda de cada ( $\lambda$ ) | Mux Tx                       | WDM Mux ES                                | 12 Ghz                                              |
| Comprimento da fibra optica            | Fibra monomodo               | SMF                                       | 20 Km                                               |
| Atenuação                              | Fibra monomodo               | SMF                                       | 0.2 db/Km p/ lambda de 1550 nm                      |
| Dispersão                              | Fibra monomodo               | SMF                                       | 16.75 os/nm/Km                                      |
| Coefficiente de PMD                    | Fibra monomodo               | SMF                                       | não considerado                                     |
| Responsividade dos Fotodiodos          | Foto detector                | Photodetector PIN                         | 0.7 A/W                                             |
| Ruído termico                          | Foto detector                | Photodetector PIN                         | 50 e-24 W/Hz                                        |
| Perda inserção                         | Divisor                      | Power splitter                            | 6 db                                                |
| Perda inserção                         | Circulador                   | circulator                                | 0.1 db                                              |
| Perda inserção                         | combinador/separador         | AWG                                       | 4.5 db                                              |

### 3.2.1.1 Resultados Obtidos

A avaliação dos resultados foi feita a partir de medidas realizadas com os vários dispositivos existentes na biblioteca do aplicativo e já destacados anteriormente.

Inicialmente, será apresentada uma análise espectral das portadoras de descendente e ascendente visualizada no analisador de espectro óptico (OSA) e no Analisador de Multiplexação WDM, ilustrados na Figura 3.14.

Na Figura 3.14 identificada como OSA 2, têm-se a saída da porta 1 do *CW DFB laser array*, onde se percebe a densidade espectral de ruído dentro de um valor aceitável, possibilitando uma relação  $C/N > 25$  dB, considerada nominal. Na Figura 3.37 identificada como OSA 1, têm-se ilustrada a saída do Mux WDM, que apresenta também uma ótima relação  $C/N$ , acima de 90 dB, indicando um correto dimensionamento do espaçamento das portadoras, aqui configurado para 100 GHz. A última figura desta sequência relativa a transmissão no sentido descendente, ilustra o bom desempenho do amplificador EDFA, considerando o ganho e o patamar de ruído apresentados.

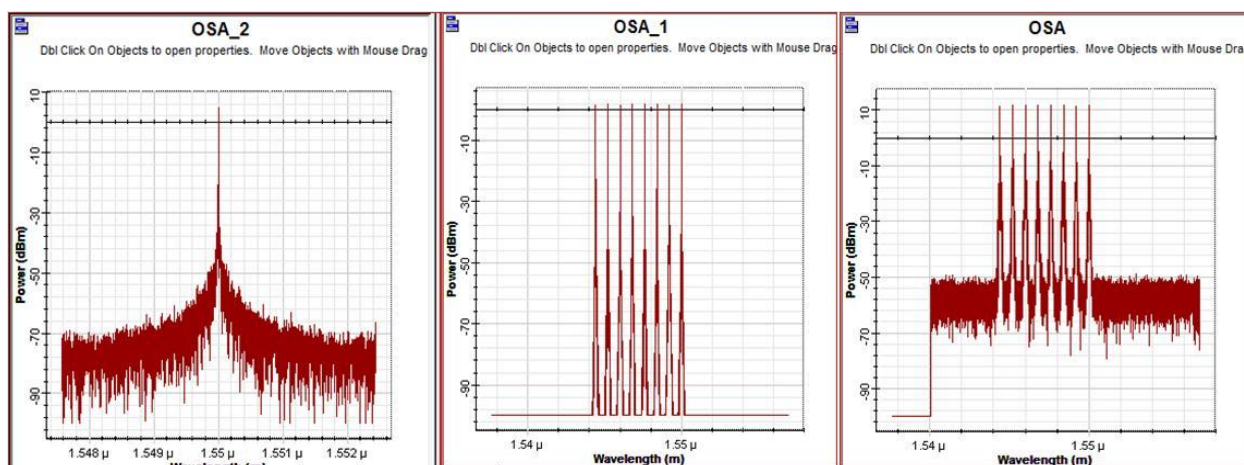


Figura 3.14: Espectros de frequência das portadoras singelas / multiplexadas

A sequência apresentada na Figura 3.15 ilustra as portadoras de recepção aplicadas aos fotodetectores nos dois sentidos ascendente (OSA 8) e descendente (OSA 4), e a portadora de transmissão no sentido *upstream* (OSA 5). No caso da recepção, percebe-se o processo seletivo executado pelo AWG, obtendo-se uma discriminação em torno de 60 dB. Na transmissão sentido ascendente (Fig 3.15 OSA 5), pode ser verificado um aumento da densidade de ruído produzido pelo transmissor óptico, quando comparado com a geração de portadora da transmissão do sentido descendente (Fig 3.14 OSA 2), da ordem de 10 dB, o que, entretanto, não comprometeu demasiadamente a qualidade do sinal recebido, conforme será mostrado a seguir.

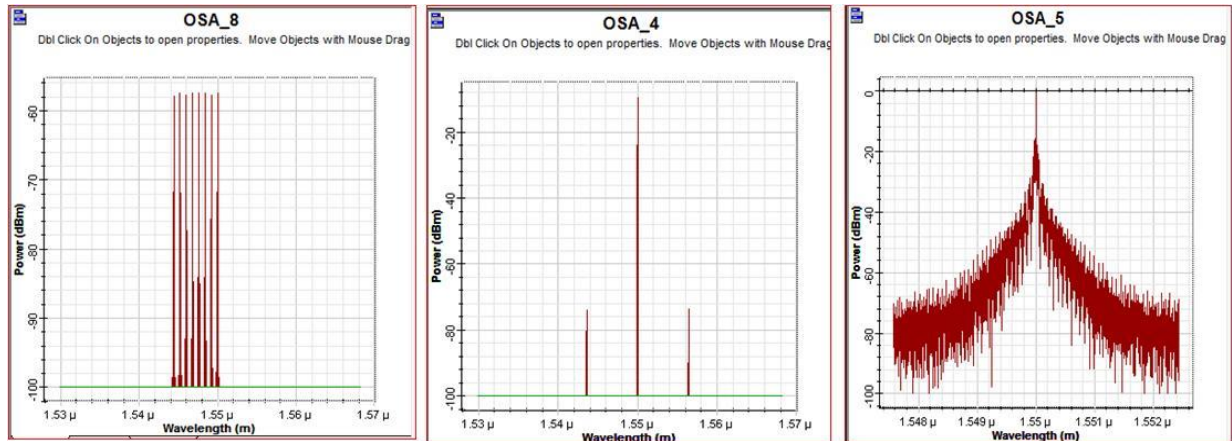


Figura 3.15: Portadoras de recepção e transmissão

De forma a se obter um melhor detalhamento das portadoras multiplexadas, foi utilizado um analisador WDM, que permite a leitura direta do nível do sinal e do ruído individualmente, estabelecendo sua inter-relação, conforme apresentado na Figura 3.16. Observa-se um melhor valor, da ordem de 3 dB, para as portadoras dos extremos da banda, devido sofrerem uma menor interferência co-canal.

| Wavelength (nm) | Signal Power (dBm) | Noise Power (dBm) | OSNR (dB) |
|-----------------|--------------------|-------------------|-----------|
| 1550            | -1.0810576         | -74.919484        | 73.838426 |
| 1549.199        | -1.0816636         | -71.804834        | 70.723171 |
| 1548.3989       | -1.081852          | -71.755569        | 70.673717 |
| 1547.5996       | -1.0811206         | -71.949677        | 70.868557 |
| 1546.8011       | -1.0816452         | -71.661924        | 70.580279 |
| 1546.0034       | -1.0824224         | -71.603873        | 70.52145  |
| 1545.2065       | -1.0821786         | -71.909403        | 70.627224 |
| 1544.4105       | -1.0825271         | -74.992403        | 73.909876 |

|                   | Signal Power (dBm) | Noise Power (dBm) | OSNR (dB) |
|-------------------|--------------------|-------------------|-----------|
| Min value         | -1.0825271         | -74.992403        | 70.52145  |
| Max Value         | -1.0810576         | -71.603873        | 73.909876 |
| Total             | 7.9490915          | -63.35152         |           |
| Ratio max/min     | 0.0014695038       | 3.3885299         | 3.3885299 |
|                   | (nm)               | (nm)              | (nm)      |
| Wavelength at min | 1544.4105          | 1544.4105         | 1546.0034 |
| Wavelength at max | 1550               | 1546.0034         | 1544.4105 |

Figura 3.16: Analisador de WDM – Medida da potência do sinal, do ruído e de sua relação.

As Figuras 3.17 a 3.19 indicam as potências em dBm presentes em determinados pontos escolhidos com o intuito de avaliar o atendimento das condições pré-estabelecidas, e também na determinação do orçamento de potência do projeto, calculado da forma:

Orçamento do enlace descendente = Ganho do EDFA - Perda no divisor - Perda no circulador TX - Perda no AWG TX - Perda no enlace óptico - Perda no AWG RX - Perda no circulador RX

$$= 17 - 6 - 0,1 - 4,5 - (0,2 \times 20) - 4,5 - 0,1 = - 2,2 \text{ dB}$$

Orçamento do enlace ascendente = Perda no circulador TX – Perda no AWG TX – Perda no enlace óptico – perda no AWG RX – Perda no circulador RX – Perda no buffer

$$= - 0,2 - 4 - (0,2 \times 20) - 4 - 0,2 - 0,2 = - 12,6 \text{ dB}$$

Assim, tem-se na Figura 3.17 a potência de entrada da rede ODN no sentido descendente, ou seja, na saída do modulador que contempla as portadoras WDM, e na Figura 3.18, tem-se a saída da rede ODN, indicando a potência de entrada no fotodetector da recepção no lado do usuário, valor compatível com a sensibilidade do mesmo. A Figura 3.19 apresenta a leitura da saída da rede ODN proveniente da transmissão do sentido ascendente, ou seja, a potência de entrada no fotodetector da recepção, no lado da operadora.

Desta forma temos:

- Potência de transmissão no sentido descendente indicado pelo medidor de potência da Figura 3.40 (-15,4 dBm) - orçamento de potência (2,2 dB) = Potência na recepção do sentido descendente, indicado pelo medidor da figura 3.18 ( - 17,5 dBm);
- Potência de transmissão no ascendente (0 dBm) - orçamento de potência (12,6 dB) = Potência na recepção do sentido descendente indicado pelo medidor da Figura 3.19 ( - 12,6 dBm).

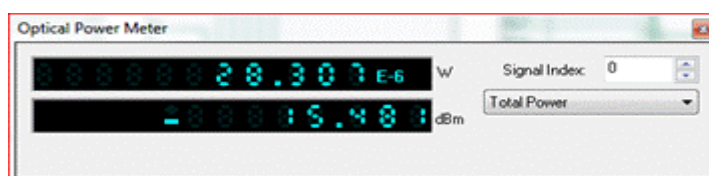


Figura 3.17: Potência de entrada na rede ODN no sentido descendente

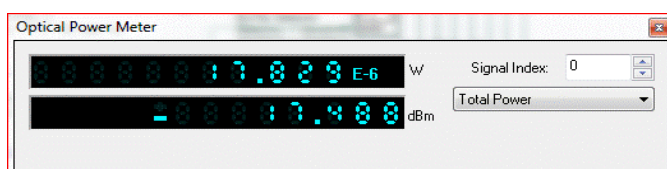




Figura 3.18: Potência de saída da rede ODN no sentido descendente



Figura 3.19: Potência de recepção do descendente na entrada do fotodetector

Finalmente, a Figura 3.20 apresenta as medidas que, de fato, podem ser consideradas como as mais decisivas, uma vez que indicam diretamente a qualidade do sinal recebido nas duas pontas, tanto através do diagrama de olho, que fornece uma imagem para uma avaliação fundamentalmente subjetiva, quanto através de um analisador de BER, que fornece uma medida absoluta da taxa de erro encontrada. Pelos valores apresentados, nota-se uma pequena melhora dessa taxa para o sentido descendente, o que já era esperado, devido aos valores de potência e ruídos medidos nos diversos pontos do sistema.

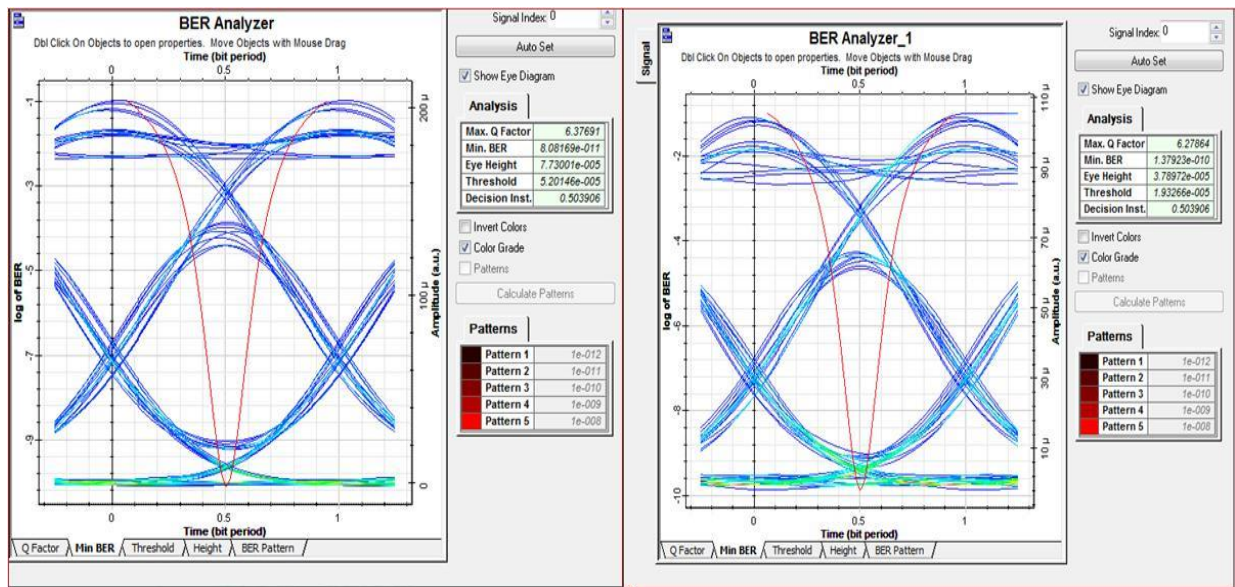


Figura 3.20: Diagrama de olho e BER de ascendente e descendente

Fonte das Figuras 3.7 a 3.20: Optisystem

### 3.2.2 Rede Híbrida WPON + GPON

Essa topologia foi desenvolvida para atender 128 usuários, sendo constituída por uma rede WPON equipada com 4 canais, cada qual compondo uma das 4 redes GPON de 32 usuários associadas, totalizando então os 128 ( $32 \times 4$ ) usuários.

A Figura 3.21 ilustra a topologia utilizada nesta simulação, entretanto cabe aqui relembrar, que novamente será apresentado um diagrama em blocos ilustrativo da configuração desenvolvida, de forma a facilitar a visualização do projeto, sendo o original apresentado no apêndice.

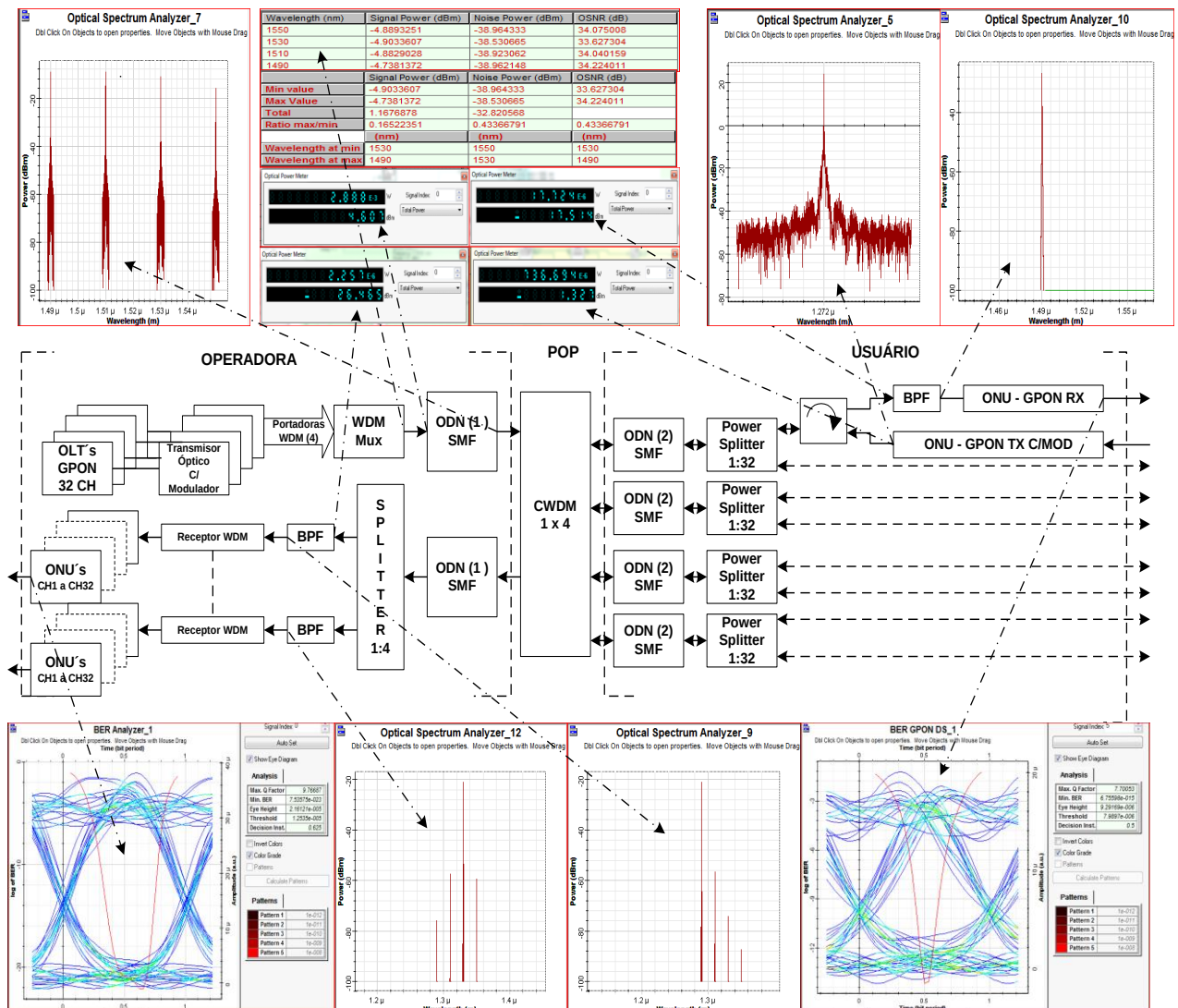


Figura 3.21: Topologia usada na simulação da rede híbrida WPON + GPON

### 3.2.2.1 Descrição da Topologia e Funcionamento

Para simular o tráfego descendente foram utilizados quatro transmissores ópticos, que já possuem incorporadas a modulação (interna) através de um sinal com codificação NRZ. Cada transmissor opera com o seu próprio comprimento de onda e foram configurados para fornecer uma potência de 0 dBm de saída.

Cabe destacar a existência de uma estação intermediária, que pode ser um ponto de presença da operadora que, além de receber as portadoras multiplexadas, abriga também as OLTs que comporão o segundo enlace da topologia, com destino final às instalações dos clientes. Essa topologia possui duas redes ODN, uma interligando a operadora ao seu ponto de presença intermediário e a segunda, desse ponto até aos usuários, possibilitando ultrapassar o limite de 20 km imposto pelas redes GPON.

Esses sinais são multiplexados no *WDM Mux* e, em seguida, encaminhados à rede externa (ODN). No lado da recepção descendente, as quatro portadoras são separadas no CWDM Demux, em seguida sendo aplicadas ao divisor passivo, que, de fato, é constituído de quatro seções de divisores/combinadores de 32 portas cada.

Cada ONU possui um filtro de entrada passa-faixa (BPF- *Band Pass Filter*) associado ao comprimento de onda estabelecido para o canal em questão, e com uma largura de banda de 10 nm, suficiente para evitar interferência co-canal. A demodulação/detecção é feita com um fotodiodo PIN, fornecendo um sinal que, após ser filtrado em um filtro passa-baixas (*Low Pass Bessel Filter*), é encaminhado para análise da taxa de BER e do diagrama de olho.

No sentido ascendente, também se utiliza um transmissor óptico, baseado em um laser DFB, utilizando travamento por sinal externo, técnica abordada no Capítulo 2, o que simplifica seu processo de sintonia e, conseqüentemente, o custo associado. A recepção dos sinais ascendente, no lado na operadora utiliza o tradicional fotodiodo PIN, que recebe a portadora específica do canal, selecionada pelo filtro passa-faixa (*Butterworth optical filter*), em cuja entrada estão presentes todas as outras portadoras.

Na verdade, nessa topologia, têm-se dois enlaces ópticos decorrentes do uso das duas tecnologias: um deles é uma rede WPON abrangendo o trajeto da operadora (OLT) até um nó remoto (ponto de presença) e o outro, uma rede GPON, desse ponto de presença até o usuário final.

De forma a otimizar o enlace intermediário, as portadoras ópticas são multiplexadas e demultiplexadas nos *multiplexers* CWDM (*CourseWavelength Division Multiplex*), localizado no ponto de presença, que também possui instalados as fontes ópticas e os amplificadores reflexivos responsáveis pelo processo de travamento dos lasers dos transmissores ópticos.

Todos os componentes dessa topologia possuem suas próprias especificações, cujos valores serão ilustrados nas Figuras 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28 e 3.29 abaixo:

Label: Layout 1

**Simulation** | Signals | Spatial effects | Noise | Signal tracing

| Name               | Value                               | Units  | Mode   |
|--------------------|-------------------------------------|--------|--------|
| Simulation window  | Set bit rate                        |        | Normal |
| Reference bit rate | <input checked="" type="checkbox"/> |        | Normal |
| Bit rate           | 10e+009                             | Bits/s | Normal |
| Time window        | 6.4e-009                            | s      | Normal |
| Sample rate        | 320e+009                            | Hz     | Normal |
| Sequence length    | 64                                  | Bits   | Normal |
| Samples per bit    | 32                                  |        | Normal |
| Number of samples  | 2048                                |        | Normal |
| Cuda GPU           | <input type="checkbox"/>            |        | Normal |

Figura 3.22: Característica do sinal de teste aplicado nos dois sentidos

Label: Optical Transmitter

... Co... En... Si... RIN C... Po... Si... N... Ra... Cu...

| Disp                                | Name             | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|------------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency        | 1490  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Power            | 0     | dBm   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Extinction ratio | 25    | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Linewidth        | 10    | MHz   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Initial phase    | 0     | deg   | Normal |

| Disp                                | Name                     | Value                     | Units  | Mode   |
|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------|--------|
| <input type="checkbox"/>            | External PRBS            | <input type="checkbox"/>  |        | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bit rate                 | Bit rate                  | Bits/s | Script |
| <input type="checkbox"/>            | Order                    | log(Sequence length)/log( |        | Script |
| <input type="checkbox"/>            | Number of leading zeros  | 1                         |        | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Number of trailing zeros | 1                         |        | Normal |

| Disp                                | Name            | Value                 | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Modulation type | NRZ                   |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Duty cycle      | 0.5                   | bit   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Position        | 0                     | bit   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Rise time       | 1 / (Bit rate) * 0.05 | s     | Script |
| <input type="checkbox"/>            | Fall time       | 1 / (Bit rate) * 0.05 | s     | Script |

| Disp                     | Name             | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|------------------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Transmitter type | EML   |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Overshoot        | 30    | %     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Undershoot       | 30    | %     | Normal |

Label: Optical Receiver

Main | Low Pa... | 3R Reg... | Downs... | Noise | Rando... | Custom...

| Disp                     | Name             | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|------------------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Photodetector    | PIN   |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Gain             | 3     |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Ionization ratio | 0.9   |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Responsivity     | 1     | A/W   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dark current     | 10    | nA    | Normal |

| Disp                                | Name             | Value           | Units | Mode   |
|-------------------------------------|------------------|-----------------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Cutoff frequency | 0.75 * Bit rate | Hz    | Script |
| <input type="checkbox"/>            | Insertion loss   | 0               | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Depth            | 100             | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Order            | 4               |       | Normal |

| Disp                     | Name                  | Value                               | Units | Mode   |
|--------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Centered at max power | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Center frequency      | 193.1                               | THz   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Sample rate           | 5 * ( Sample rate )                 | Hz    | Script |

| Disp                     | Name                       | Value                               | Units | Mode   |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Noise calculation type     | Numerical                           |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add signal-ASE noise       | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add ASE-ASE noise          | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add shot noise             | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add thermal noise          | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Estimate receiver noise    | <input type="checkbox"/>            |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Thermal noise              | 100e-024                            | W/Hz  | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Approximate sensitivity    | -18                                 | dBm   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Reference extinction ratio | 10                                  | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Reference Q factor         | 6.4634                              |       | Normal |

Figura 3.23: Parâmetros dos transmissores e receptores ópticos no sentido descendente



Label: Wideband Traveling Wave SQA

Main | Phys... | Enha... | Nume... | Simul... | Noise | Rand... | Custo...

| Disp                     | Name                      | Value                  | Units | Mode   |
|--------------------------|---------------------------|------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Injection current         | 0.3                    | A     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Input coupling loss       | 3                      | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Output coupling loss      | 3                      | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Input facet reflectivity  | 50.00000000000001e-006 |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Output facet reflectivity | 50.00000000000001e-006 |       | Normal |

| Disp                     | Name                       | Value                  | Units | Mode   |
|--------------------------|----------------------------|------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Active length              | 0.0006                 | m     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Taper length               | 0                      | m     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Cross-section data         |                        |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Width                      | 0.4e-006               | m     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Height                     | 0.4e-006               | m     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Active area                | 0.16e-012              | m^2   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Optical confinement factor | 0.45                   |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Recombination coefficient  | 360e+006               | 1/s   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Recombination coefficient  | 0.559999999999998e-015 | m^3/s | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Recombination coefficient  | 30e-042                | m^6/s | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Group velocity             | 75e+006                | m/s   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Temperature                | 300                    | K     | Normal |

| Disp                     | Name                   | Value              | Units | Mode   |
|--------------------------|------------------------|--------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Noise center frequency | 1550.116122026887  | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise bandwidth        | 10                 | THz   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise bins spacing     | 125                | GHz   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise threshold        | -100               | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise dynamic          | 3                  | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Convert noise bins     | Convert noise bins | 5     | Script |

Label: Wideband Traveling Wave SQA\_1

Main | Phys... | Enha... | Nume... | Simul... | Noise | Rand... | Custo...

| Disp                     | Name                      | Value                  | Units | Mode   |
|--------------------------|---------------------------|------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Injection current         | 0.35                   | A     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Input coupling loss       | 3                      | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Output coupling loss      | 3                      | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Input facet reflectivity  | 50.00000000000001e-006 |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Output facet reflectivity | 50.00000000000001e-006 |       | Normal |

| Disp                     | Name                       | Value                  | Units | Mode   |
|--------------------------|----------------------------|------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Active length              | 0.0006                 | m     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Taper length               | 0                      | m     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Cross-section data         |                        |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Width                      | 0.4e-006               | m     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Height                     | 0.4e-006               | m     | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Active area                | 0.16e-012              | m^2   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Optical confinement factor | 0.45                   |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Recombination coefficient  | 360e+006               | 1/s   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Recombination coefficient  | 0.559999999999998e-015 | m^3/s | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Recombination coefficient  | 30e-042                | m^6/s | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Group velocity             | 75e+006                | m/s   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Temperature                | 288                    | K     | Normal |

| Disp                     | Name                   | Value              | Units | Mode   |
|--------------------------|------------------------|--------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Noise center frequency | 1320               | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise bandwidth        | 10                 | THz   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise bins spacing     | 125                | GHz   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise threshold        | -100               | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise dynamic          | 3                  | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Convert noise bins     | Convert noise bins | 5     | Script |

Figura 3.24: Parâmetros dos amplificadores reflexivos usados nos dois sentidos (ascendente e descendente)

Fonte:

Label: Bidirectional Optical Fiber

Main | Dis... | PMD | No... | En... | Nu... | Gr... | Si... | N... | Ra... | Cu...

| Disp                                | Name                       | Value           | Units | Mode   |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/>            | User defined reference w   |                 |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Reference wavelength       | 1550            | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Length                     | 60              | km    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation effect         |                 |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation data type      | Constant        |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation                | 0.2             | dB/km | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation vs. wavelength | Attenuation.dat |       | Normal |

| Disp                                | Name                      | Value                     | Units     | Mode   |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|--------|
| <input type="checkbox"/>            | Group velocity dispersion |                           |           | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Third-order dispersion    |                           |           | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Dispersion data type      | Constant                  |           | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Frequency domain param    |                           |           | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Dispersion                | 16.75                     | ps/nm/km  | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Dispersion slope          | 0.075                     | ps/nm^2/k | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Beta 2                    | -20                       | ps^2/km   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Beta 3                    | 0                         | ps^3/km   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Dispersion file format    | Dispersion vs. wavelength |           | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Dispersion file name      | Dispersion.dat            |           | Normal |

Label: Bidirectional Optical Fiber

Main | Dis... | PMD | No... | En... | Nu... | Gr... | Si... | N... | Ra... | Cu...

| Disp                     | Name                          | Value            | Units | Mode   |
|--------------------------|-------------------------------|------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Self-phase modulation         |                  |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Cross-phase modulation        |                  |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Effective area data type      | Constant         |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Effective area                | 80               | um^2  | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Effective area vs. wavelength | EffectiveAra.dat |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | n2 data type                  | Constant         |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | n2                            | 26e-021          | m^2/W | Normal |
| <input type="checkbox"/> | n2 vs. wavelength             | n2.dat           |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Raman scattering              |                  |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Fract. Raman contribution     | 0.18             |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Raman gain data type          | Calculate        |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Raman gain peak               | 100e-015         |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Raman gain reference pu       | 1000             | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Gain vs. wavelength           | RamanGain.dat    |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Polarization factor           | 2                |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Temperature                   | 300              | K     | Normal |

Figura 3.25: Características da fibra óptica usada no enlace

Label: BPF GPON DS

Main | Simulation | Noise | Custom order

| Disp                                | Name           | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|----------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency      | 1490  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bandwidth      | 10    | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Insertion loss | 0     | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Depth          | 100   | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Order          | 3     |       | Normal |

Label: BPF GPON DS\_1

Main | Simulation | Noise | Custom order

| Disp                                | Name           | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|----------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency      | 1510  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bandwidth      | 10    | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Insertion loss | 0     | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Depth          | 100   | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Order          | 3     |       | Normal |

Figura 3.26: Filtro passa banda de recepção descendente

Label: GPON ONU

Co... En... Si... RIN C... Po... Si... N... Ra... Cu...

| Disp                                | Name             | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|------------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency        | 1290  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Power            | 0     | dBm   | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Extinction ratio | 25    | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Linewidth        | 10    | MHz   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Initial phase    | 0     | deg   | Normal |

| Disp                                | Name            | Value                 | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Modulation type | NRZ                   |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Duty cycle      | 0.5                   | bit   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Position        | 0                     | bit   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Rise time       | 1 / (Bit rate) * 0.05 | s     | Script |
| <input type="checkbox"/>            | Fall time       | 1 / (Bit rate) * 0.05 | s     | Script |

Label: GPON Rx 1490

Main Downsampling Noise Random numbers Custom order

| Disp                     | Name         | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|--------------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Responsivity | 1     | A/W   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dark current | 10    | nA    | Normal |

| Disp                     | Name                    | Value                               | Units | Mode   |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Noise calculation type  | Numerical                           |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add signal-ASE noise    | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add ASE-ASE noise       | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add thermal noise       | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Thermal noise           | 50e-024                             | W/Hz  | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add shot noise          | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Shot noise distribution | Gaussian                            |       | Normal |

Figura 3.27: Transmissor e receptor lado ONU

Label: CW Laser

Main Polarization Simulation Noise Random nu... Custom o...

| Disp                                | Name          | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|---------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency     | 1456  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Power         | 247   | mW    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Linewidth     | 10    | MHz   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Initial phase | 0     | deg   | Normal |

Label: CW Laser\_1

Main Polarization Simulation Noise Random nu... Custom o...

| Disp                                | Name          | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|---------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency     | 1272  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Power         | 340   | mW    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Linewidth     | 10    | MHz   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Initial phase | 0     | deg   | Normal |

Figura 3.28: Laser de bombeamento para travamento dos transmissores do sentidos ascendente e descendente

Label: BPF GPON DS

Main Simulation Noise Custom order

| Disp                                | Name           | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|----------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency      | 1490  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bandwidth      | 10    | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Insertion loss | 0     | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Depth          | 100   | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Order          | 3     |       | Normal |

Label: BPF GPON DS\_1

Main Simulation Noise Custom order

| Disp                                | Name           | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|----------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency      | 1510  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Bandwidth      | 10    | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Insertion loss | 0     | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Depth          | 100   | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Order          | 3     |       | Normal |

Label: LP Bessel Filter GPON DS

Main Simulation Custom order

| Disp                                | Name             | Value           | Units | Mode   |
|-------------------------------------|------------------|-----------------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Cutoff frequency | 0.75 * Bit rate | Hz    | Script |
| <input type="checkbox"/>            | Insertion loss   | 0               | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Depth            | 100             | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Order            | 4               |       | Normal |

Figura 3.29: Filtros utilizados na recepção descendente

De forma a sintetizar a configuração adotada, a Tabela 3.11 apresenta os principais parâmetros utilizados:

Tabela 3.14: Principais parâmetros dos componentes usados na simulação WPON+GPON

| Parâmetro                                      | Componente                   |                              | Valor             |
|------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|
|                                                | Funcionalidade               | Nomenclatura                 |                   |
| Frequencia de operação Downstream              | Laser Tx Downstream          | Optical transmitter          | 1490 nm           |
| Frequencia de operação upstram                 | Laser TX Upstream            | GPON ONU                     | 1290 nm           |
| Potencia de upstream                           | Laser TX Upstream            | GPON ONU                     | 0 dbm /           |
| Potência de saída Down / Upstream              | Lasers TX                    | Optical transmitter/GPON ONU | 0 dbm /           |
| Taxa de transmissão Down/Upstream              | Script dos parametros gerais | Layout 1                     | 10 Gbps           |
| Comprimento da sequência                       | Script dos parametros gerais | Layout 1                     | 64 bits           |
| Extinction ratio                               | Transmissor Downstream       | Optical transmitter          | 25 db             |
| Extinction ratio                               | Laser TX Upstream            | GPON ONU                     | 25 db             |
| Largura de banda/espacamento dos ( $\lambda$ ) | Lasers TX Down/upstream      | Optical transmitter/GPON ONU | 2/20 nm           |
| Comprimento da fibra optica                    | Fibra monomodo               | SMF                          | 60 Km             |
| Atenuação                                      | Fibra monomodo               | SMF                          | 0.2 db p/ 1550 nm |
| Dispersão                                      | Fibra monomodo               | SMF                          | 16.75 os/nm/Km    |
| Responsividade dos Fotodiodos                  | Recepção do upstream(OLT)    | Optical receiver             | 1 A/W             |
| Ruido Termico                                  | Laser Tx Downstream          | Optical transmitter          | 100 e -24         |
| Ruido termico                                  | Recepção do downstream       | GPON RX                      | 50 e-24           |
| Frequencia central                             | Receptor do upstream(OLT)    | Optical receiver             | 193.1 Thz         |
| Corrente de injeção                            | SOA TX/RX                    | Wideband Traveling Wave SOA  | 0.3 A             |
| Acoplamento entrada/saída                      | SOA TX/RX                    | Wideband Traveling Wave SOA  | 3 db              |
| Reflectividade da face entrada/saída           | SOA TX/RX                    | Wideband Traveling Wave SOA  | 50 e-6            |
| Frequencia central do ruido/BW                 | SOA TX                       | Wideband Traveling Wave SOA  | 1320 nm/ 10 Thz   |
| Frequencia central do ruido/BW                 | SOA RX                       | Wideband Traveling Wave SOA  | 1550 nm/ 10 Thz   |
| Responsividade dos Fotodiodos                  | Recepção do downstream       | GPON RX                      | 1 A/W             |
| Perda de inserção                              | Divisor/combinador           | 4:128 splitter               | 6 db              |
| Perda de inserção                              | Multiplex WDM                | CWDM                         | 6 db              |

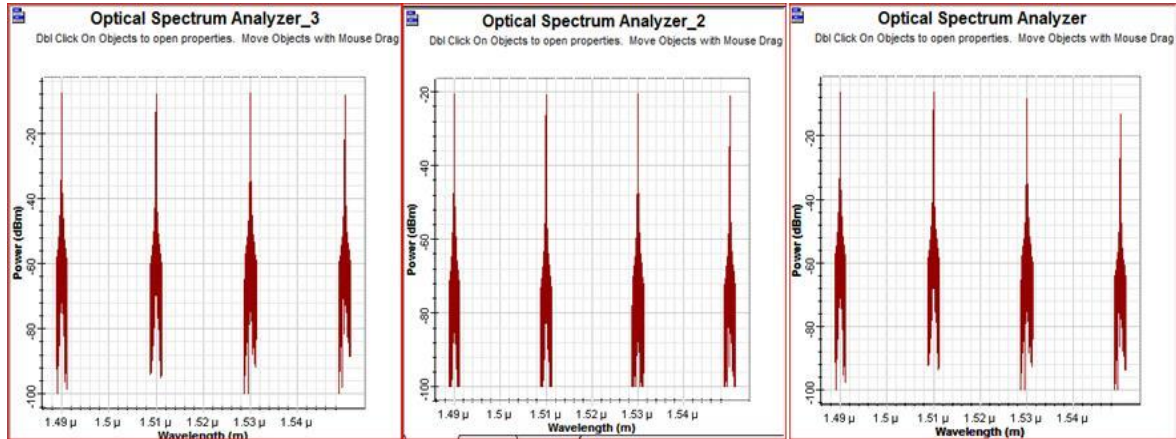
### 3.2.2.2 Resultados Obtidos

A avaliação dos resultados foi feita a partir de medidas realizadas com os vários dispositivos de teste existentes na biblioteca do aplicativo e já destacados anteriormente.

Nas Figuras 3.30 a 3.35 são apresentados os resultados obtidos, sendo acompanhadas dos comentários técnicos associados.



Nas Figuras 3.30 têm-se as portadoras multiplexadas: (a) saída do Mux (OSA 3); (b) saída da rede ODN (OSA 2); (c) saída do SOA (OSA 0), onde se pode observar, a menos das diferenças de amplitude, a semelhança dos espectros.



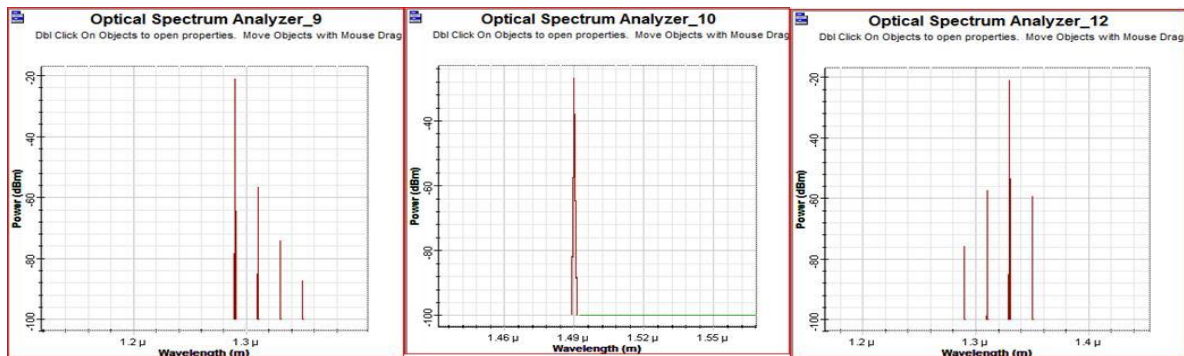
(a)

(b)

(c)

Figura 3.30: Portadoras singelas, multiplexadas da transmissão descendente

Na Figura 3.31 (a) e (b), tem-se as portadoras de recepção ascendente na saída dos filtros de canal (*Butterworth Optical Filter*), respectivamente para o canal # 0 (OSA 9) e canal # 2 (OSA 10), onde se percebe a discriminação imposta pelos filtros associados, da ordem de 20 dB, suficiente para uma boa demodulação com baixa interferência co-canal. Em (c) pode-se observar a presença apenas da portadora associada ao canal em análise, neste caso o canal #0 (OSA 12), o que pode ser explicado pela atuação do CWDM, no sentido descendente, como demultiplexador, segregando assim as portadoras. Cabe ressaltar que o CWDM, no sentido ascendente, tem a função de multiplexador, idêntica ao Mux da transmissão descendente.



(a)

(b)

(c)

Figura 3.31: Portadoras de recepção do ascendente (a) e (b) e recepção do descendente(c)

A Figura 3.32 apresenta as leituras obtidas com um analisador WDM, na saída do Mux da transmissão, sentido descendente, que permite medidas absolutas e mais precisas do que aquelas obtidas na forma gráfica, com o analisador de espectro. Aqui, se pode perceber um desvio máximo de 0,4 dB entre a relação sinal ruído das portadoras, fator importante para garantir uma comparação de desempenho de cada uma delas.

| Wavelength (nm)   | Signal Power (dBm) | Noise Power (dBm) | OSNR (dB)  |
|-------------------|--------------------|-------------------|------------|
| 1550              | -4.8893251         | -38.964333        | 34.075008  |
| 1530              | -4.9033607         | -38.530665        | 33.627304  |
| 1510              | -4.8829028         | -38.923062        | 34.040159  |
| 1490              | -4.7381372         | -38.962148        | 34.224011  |
|                   |                    |                   |            |
| Min value         | -4.9033607         | -38.964333        | 33.627304  |
| Max Value         | -4.7381372         | -38.530665        | 34.224011  |
| Total             | 1.1676878          | -32.820568        |            |
| Ratio max/min     | 0.16522351         | 0.43366791        | 0.43366791 |
|                   | (nm)               | (nm)              | (nm)       |
| Wavelength at min | 1530               | 1550              | 1530       |
| Wavelength at max | 1490               | 1530              | 1490       |

Figura 3.32: Analisador de WDM – Medida da potência do sinal, do ruído e de sua relação

As Figuras 3.33 e 3.34 apresentam os valores absolutos das potências em ambos os sentidos. Na figura 3.33 (a) e (b), tem-se as potências de transmissão, respectivamente, relativas à saída do Mux, ou seja, na entrada da rede ODN, e à saída dessa rede, o que indica um orçamento de potência na primeira seção (OLT para ODN) de 7,56 dB, compatível com o comprimento do enlace adotado (60 km) e com as perdas de inserção dos componentes intermediários. O nível de recepção no sentido descendente que chega à recepção da ONU é mostrado na Figura 3.35 (c), apresentando um valor compatível com a sensibilidade do fotodetector, indicando um orçamento de potência da segunda seção de 14 dB, sendo o *splitter* 1:4 responsável por 7 dB; o CWDM, por 3 dB, e a rede de fibra, por 4 dB (20 km x 0,2 dB/km).

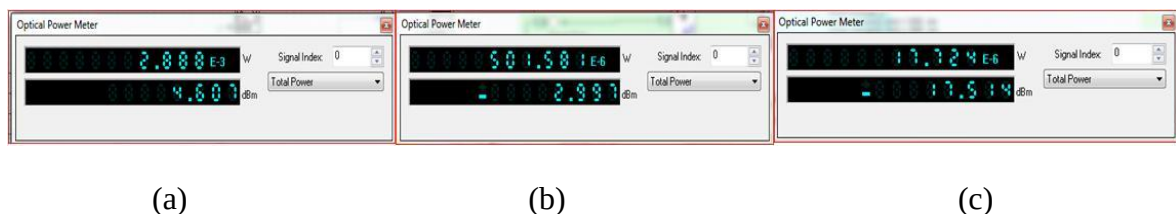


Figura 3.33: Nível de potência óptica da TX (a), da RX (b), e do lado da OLT sentido descendente (c)

Na transmissão ascendente pela ONU, a Figura 3.34 (a) indica a potência de transmissão após o *delay*, enquanto que em (b), têm-se o sinal no ponto em que se considerou a interface entre as duas seções. Assim, têm-se como orçamento de potência, nesta seção, o somatório da atenuação da fibra no trajeto (4 dB); do *splitter* 1:4 (7 dB); do CWDM (3 dB), totalizando 14 dB, coerente com a diferença entre (a) e (b).

O orçamento da segunda seção, neste caso, do ponto de presença até a operadora, tomando por base as medidas em (c) e (b), é de 11dB, decorrente da perda de inserção do divisor 1:4 (6 dB); do enlace de 60 km de fibra (3dB); de um enlace complementar de fibra de 3.5 km ( 0,7 dB) e do atenuador inserido no enlace (1 dB), coerente com a diferença entre (c) e (b).



(a)

(b)

(c)

Figura 3.34: Nível de potência óptica da TX (a), da RX (b), e do lado da ONU sentido ascendente (c)

A seguir, têm-se a análise da qualidade dos dados recebidos através da medição da taxa de erro de bit e da análise do diagrama de olho, que, apesar de possuir um procedimento e especificação para leituras diretas no monitor gráfico, permite uma avaliação subjetiva da medida considerando a “abertura do olho”, ou seja, a região central do gráfico.

A Figura 3.35 (a), associada à recepção ascendente, apresentou um valor de BER de  $3.9 \times 10^{-7}$ , pior que o especificado, ( $1 \times 10^{-10}$ ), e, por conseguinte, tornando necessária a adequação dos parâmetros. A alternativa mais viável, considerando a assimetria do tráfego GPON, seria a redução da taxa de transmissão no sentido ascendente; entretanto, o modelo utilizado, disponível na biblioteca do aplicativo, não permitiu a configuração assimétrica dos enlaces; sendo assim, poderá ser alvo de investigação futura.

Todavia, a Figura 3.35(b), relativa ao sentido descendente, apresenta um valor da taxa de BER ( $1.4 \times 10^{-22}$ ), muito melhor do que o especificado, o que pode ser explicado pela diferença observada no orçamento de potência apresentado, da ordem de 4 dB. Claramente, percebe-se uma maior “abertura do olho”, confirmando a medida do BER.

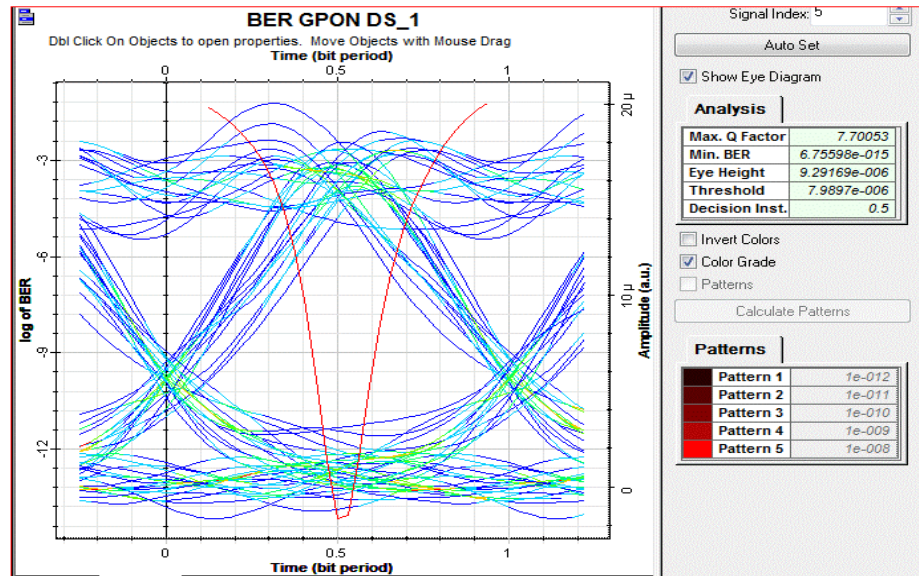


Figura 3.58(a): Diagrama de olho e BER no sentido descendente

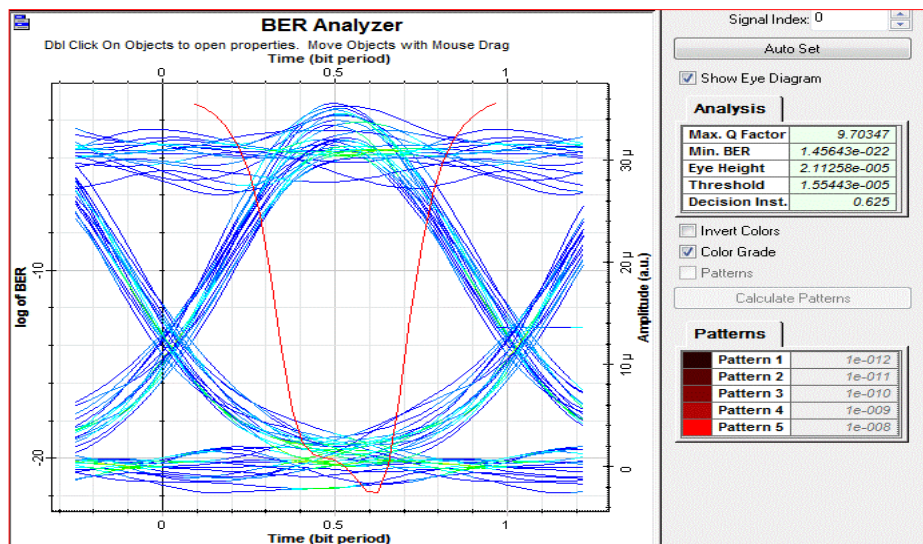


Figura 3.35(b): Diagrama de olho e BER no sentido ascendente

### 3.2.3 Rede OCDMA

Ao contrário das características das redes estudadas até aqui, onde se tinha um número grande de usuários finais, esta simulação apresenta uma topologia desenvolvida para um sentido de transmissão e para um numero pequeno de usuários, cada um deles com uma capacidade maior de transmissão. Assim como no caso anterior, esta solução poderá ser aplicada em



conjunto com a solução GPON, preferencialmente com aquelas de maior capacidade, como 10GPON ou XGPON.

A Figura 3.36 ilustra a topologia utilizada, que será detalhada a seguir:

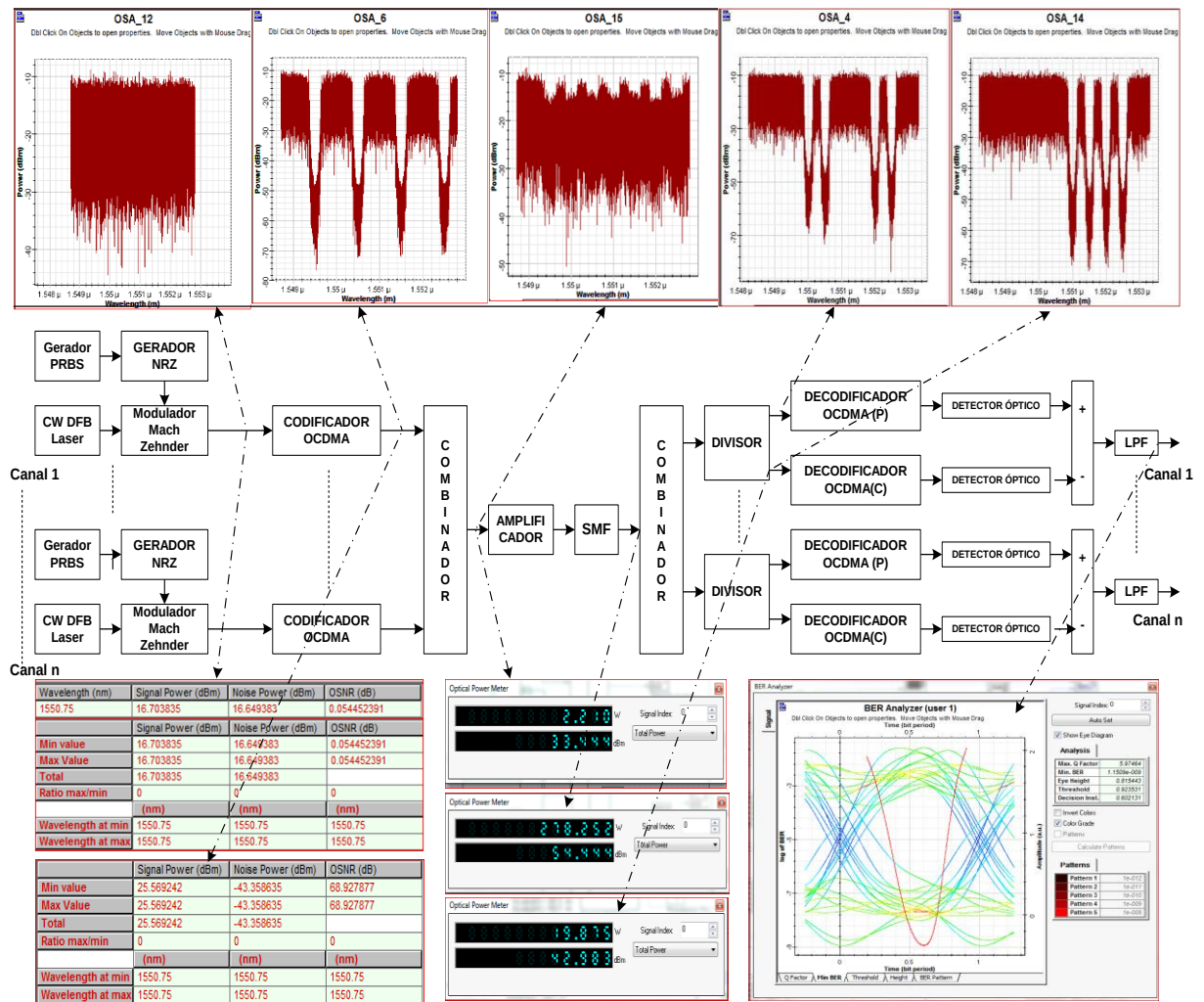


Figura 3.59: Topologia usada na simulação da rede OCDMA

### 3.2.3.1 Descrição da Topologia e Funcionamento

A topologia apresentada utiliza a técnica SAE (*Spectral amplitude encode*), também conhecida como SAC (*Spectral Amplitude Coding*), detalhada no Capítulo 2, que se baseia na codificação de componentes espectrais provenientes de um sinal de banda muito larga (ora bloqueados, ora transmitidos), de acordo com um determinado código associado a cada usuário. No lado da recepção, o sinal passa por um filtro idêntico ao usado na transmissão. A saída dos



filtros principais e complementares é encaminhada para dois fotodetectores na configuração balanceada. Um sinal interferente que não esteja correlacionado ao código específico será cancelado, enquanto o sinal associado será demodulado com a ajuda do *Threshold Detection* (Detector de limiar). Assim sendo, nesse tipo de configuração, não haverá o efeito MAI.

Para simular o tráfego de transmissão na direção descendente, foi utilizado um modulador *Mach Zehnder*, tendo como geração da portadora um transmissor DFB, e simulando a entrada de dados, um gerador de PRBS, com codificação NRZ ilustrado na Figura 3.37.

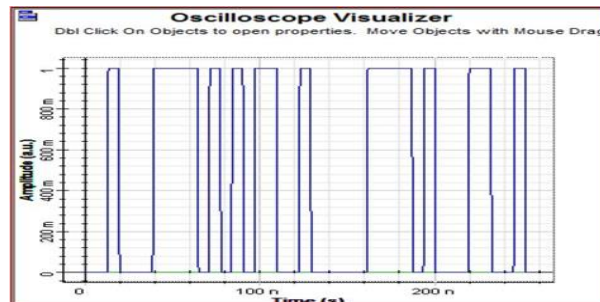


Figura 3.37: Sinal de teste NRZ gerando uma sequência PRBS

A saída modulada é encaminhada ao codificador OCDMA, que opera com quatro-comprimentos de onda para fazer a codificação espectral, a qual será associada a uma codificação temporal, compondo o código 2D. Todas essas portadoras já codificadas são combinadas, amplificadas no EDFA e, finalmente encaminhadas à rede ODN.

Ao chegar no lado da recepção, o sinal é sub-dividido em dois de forma a alimentar os decodificadores OCDMA; principal e complementar, responsáveis pela discriminação das portadoras associados ao canal associado, as quais são em seguida demoduladas ou detectados pelos fotodiodos, fornecendo o sinal de saída de dados.

Aqui também foi possível a configuração de todos os componentes utilizados na topologia, as quais serão mostradas nas Figuras 3.38 a 3.42

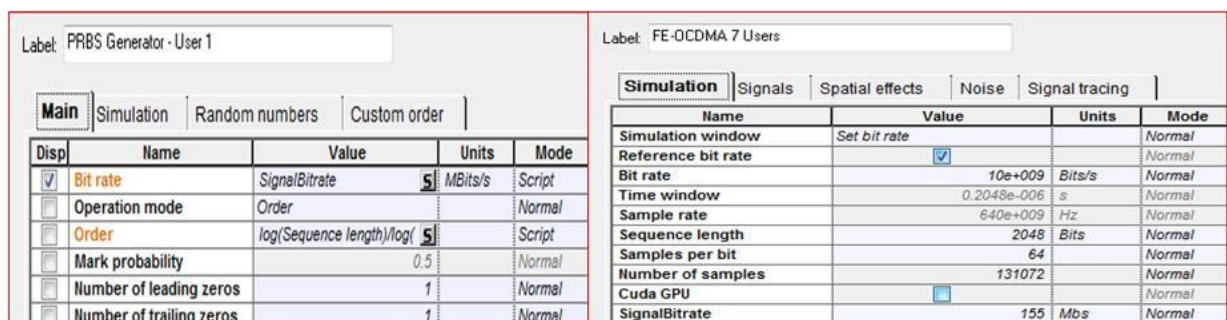


Figura 3.38: Características do sinal de teste de dados – Taxa de transmissão

Label: MachZehnder Modulator

Main | Simulation | Custom order

| Disp                                | Name                  | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-----------------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Extinction ratio      | 30    | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Negative signal chirp |       |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Symmetry factor       | -1    |       | Normal |

Label: White Light Source

Main | Simulation | Noise | Random numbers | Custom order

| Disp                                | Name      | Value                               | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Frequency | 1550.75                             | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | PSD       | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Power     | -80                                 | dBm   | Normal |

(a)

(b)

Figura 3.39: Modulação do sinal: (a) geração da portadora; (b) modulador Mach-Zehnder

Label: Encoder 10101010

Image | Custom order | FBG

| Disp                                | Name        | Value  | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-------------|--------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength1 | 1549.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength2 | 1550.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength3 | 1551.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength4 | 1552.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | bandwidth   | 0.3    | nm    | Normal |

Label: Decoder 10101010

Image | Custom order | FBG

| Disp                                | Name        | Value  | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-------------|--------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength1 | 1549.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength2 | 1550.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength3 | 1551.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength4 | 1552.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | bandwidth   | 0.3    | nm    | Normal |

Label: Decoder 10101010\_1

Image | Custom order | FBG

| Disp                                | Name        | Value | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-------------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength1 | 1549  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength2 | 1550  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength3 | 1551  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength4 | 1552  | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | bandwidth   | 0.3   | nm    | Normal |

(a)

(b)

(c)

Figura 3.40: Codec ch #1: Encoder (a); Decoder principal (b); Decoder complementar (c)

Label: Encoder 11001100

Image | Custom order | FBG

| Disp                                | Name        | Value  | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-------------|--------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength1 | 1550   | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength2 | 1550.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength3 | 1552   | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength4 | 1552.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | bandwidth   | 0.3    | nm    | Normal |

Label: Decoder 11001100

Image | Custom order | FBG

| Disp                                | Name        | Value  | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-------------|--------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength1 | 1550   | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength2 | 1550.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength3 | 1552   | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength4 | 1552.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | bandwidth   | 0.3    | nm    | Normal |

Label: Decoder 11001100\_1

Image | Custom order | FBG

| Disp                                | Name        | Value  | Units | Mode   |
|-------------------------------------|-------------|--------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength1 | 1549   | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength2 | 1549.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength3 | 1551   | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Wavelength4 | 1551.5 | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | bandwidth   | 0.3    | nm    | Normal |

Figuras 3.41: Codec ch # 2: Encoder (a); Decoder principal (b); Decoder complementar (c)

Label: EDFA Ideal

Main | Polarization | Simulation | Noise | Random nu... | Custom o...

| Disp                     | Name                   | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|------------------------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Noise center frequency | 1550  | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise bandwidth        | 20    | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Noise bins spacing     | 125   | GHz   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Convert noise bins     | 5     |       | Script |

| Disp                                | Name             | Value                               | Units | Mode   |
|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/>            | Operation mode   | Gain Control                        |       | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Gain             | 25                                  | dB    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Power            | 10                                  | dBm   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Saturation power | 10                                  | dBm   | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Saturation port  | Output                              |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Include noise    | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Noise figure     | 6                                   | dB    | Normal |

Label: Power Combiner

Main | Custom order

| Disp                     | Name                  | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|-----------------------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Number of input ports | 7     |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Loss                  | 0     | dB    | Normal |

Label: Power Splitter

Main | Custom order

| Disp                     | Name                   | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|------------------------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Number of output ports | 7     |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Loss                   | 0     | dB    | Normal |

Label: Power Splitter 1x2

Main | Custom order

| Disp                     | Name | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Loss | 0     | dB    | Normal |

(a)

(b)

Figura 3.42: Amplificador óptico (a), combinadores e divisores (splitters) (b) utilizado no enlace

Label: Optical Fiber

Main
Dis...
PMD
No...
Nu...
Gr...
Sim...
N...
Ran...
Cus...

| Disp                     | Name                      | Value         | Units       | Mode   |
|--------------------------|---------------------------|---------------|-------------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Birefringence type        | Deterministic |             | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Differential group delay  | 0.2           | ps/km       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | PMD coefficient           | 0.5           | ps/sqrt(km) | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Mean scattering section I | 500           | m           | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Scattering section disper | 100           | m           | Normal |

| Disp                                | Name                      | Value                               | Units | Mode   |
|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/>            | User defined reference w  | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Reference wavelength      | 1550                                | nm    | Normal |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Length                    | 20                                  | km    | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation effect        | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation data type     | Constant                            |       | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation               | 0.2                                 | dB/km | Normal |
| <input type="checkbox"/>            | Attenuation vs. wavelengt | Attenuation.dat                     |       | Normal |

Label: Optical Fiber

Main
Dis...
PMD
No...
Nu...
Gr...
Sim...
N...
Ran...
Cus...

| Disp                     | Name                      | Value                               | Units                 | Mode   |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Group velocity dispersion | <input checked="" type="checkbox"/> |                       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Third-order dispersion    | <input checked="" type="checkbox"/> |                       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dispersion data type      | Constant                            |                       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Frequency domain param    | <input type="checkbox"/>            |                       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dispersion                | 16.75                               | ps/nm/km              | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dispersion slope          | 0.075                               | ps/nm <sup>2</sup> /k | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Beta 2                    | -20                                 | ps <sup>2</sup> /km   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Beta 3                    | 0                                   | ps <sup>3</sup> /km   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dispersion file format    | Dispersion vs. wavelength           |                       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dispersion file name      | Dispersion.dat                      |                       | Normal |

Figura 3.43: Características da fibra óptica utilizada na rede externa ( ODN)

Label: Photodetector PIN

Main
Downsampling
Noise
Random numbers
Custom order

| Disp                     | Name                  | Value                    | Units | Mode   |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Centered at max power | <input type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Center frequency      | 1550.75                  | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Sample rate           | Sample rate              | Hz    | Script |

| Disp                     | Name                  | Value                    | Units | Mode   |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Centered at max power | <input type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Center frequency      | 1550.75                  | nm    | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Sample rate           | Sample rate              | Hz    | Script |

| Disp                     | Name                    | Value                               | Units | Mode   |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Noise calculation type  | Numerical                           |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add signal-ASE noise    | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add ASE-ASE noise       | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add thermal noise       | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Thermal noise           | 9.999999999999999e-024              | W/Hz  | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Add shot noise          | <input checked="" type="checkbox"/> |       | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Shot noise distribution | Gaussian                            |       | Normal |

| Disp                     | Name         | Value | Units | Mode   |
|--------------------------|--------------|-------|-------|--------|
| <input type="checkbox"/> | Responsivity | 1     | A/W   | Normal |
| <input type="checkbox"/> | Dark current | 10    | nA    | Normal |

Figura 3.44: Parâmetros do fotodetector usado na recepção

A Tabela 3.12 apresenta a síntese das configurações adotadas nos diversos componentes.

Tabela 3.12: Síntese das configurações adotadas nos diversos componentes

| Parâmetro                                     | Componente                            |                                | Valor             |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
|                                               | Funcionalidade                        | Nomenclatura                   |                   |
| Frequencia de operação                        | Gerador da portadora                  | White light source             | 1550.75 nm        |
| Potência de saída                             | Gerador da portadora                  | White light source             | - 80 dbm          |
| Taxa de transmissão                           | Gerador de sequencia pseudo aleatoria | PRBS Generator                 | 10 Gbps ( script) |
| Comprimento da sequência                      | Gerador de sequencia pseudo aleatoria | PRBS Generator                 | 2048 bits         |
| Extinction ratio                              | Modulador                             | Modulador Mach-Zehnder         | 30 db             |
| Comprimentos de onda ( $\lambda$ ) utilizados | Codec's                               | Encoder/Decoder # 1            | 1549.5/1550.5/    |
| Largura de banda de cada ( $\lambda$ )        | Codec's                               | Encoder/Decoder # 1 (10101010) | 0,3 nm            |
| Comprimento da fibra optica                   | Fibra monomodo                        | SMF ( Optical Fiber)           | 20 Km             |
| Atenuação                                     | Fibra monomodo                        | SMF ( Optical Fiber)           | 0,2 db/Km         |
| Dispersão                                     | Fibra monomodo                        | SMF ( Optical Fiber)           | 16,75 ps/nm/Km    |
| Atraso de grupo diferencial                   | Fibra monomodo                        | SMF ( Optical Fiber)           | 0,2 ps/Km         |
| Coeficiente de PMD                            | Fibra monomodo                        | SMF ( Optical Fiber)           | 0,5 os/Km2        |
| Responsividade dos Fotodiodos                 | Foto detector                         | Photodetector PIN              | 1 A/W             |
| Frequencia central de operação                | Foto detector                         | Photodetector PIN              | 1550,75 nm        |
| Ruido termico                                 | Foto detector                         | Photodetector PIN              | 10-23 W/Hz        |

### 3.2.3.2 Resultados Obtidos

A avaliação dos resultados foi feita a partir de medidas realizadas com os vários dispositivos de teste existentes na biblioteca do aplicativo e já destacados anteriormente.

A Figura 3.45 (a) apresenta o espectro presente na saída do modulador *Mach-Zehnder*, centrado no comprimento de onda em 1550,75 nm, onde se observa uma grande largura de banda, face à alta taxa de transmissão imposta nessa simulação. Considerando a dificuldade na leitura do diagrama da Figura 3.68 em (a), tem-se em (c) a análise obtida do WDM, onde se percebe uma relação sinal ruído extremamente baixa típica dos sistemas CDMA.

Na Figura 3.45 (b), tem-se a saída do combinador, onde estão presentes todos os comprimentos de onda produzidos nos codificadores, os quais serão amplificados no EDFA, antes do envio à rede ODN.



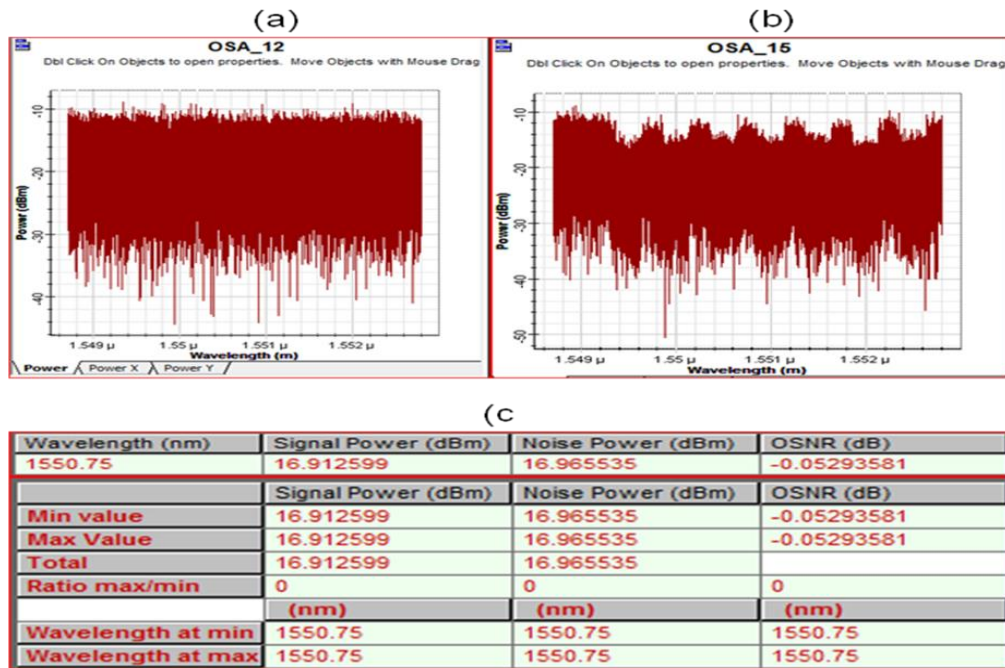


Figura 3.45: (a) Saída do modulador Mach-Zehnder;(b) Saída de todos os comprimentos de onda combinados ;(c) Análise do sinal em (a) obtida do analisador WDM

A Figura 3.46 ilustra os comprimentos de onda presentes nos codecs (*encoder/decoders*) do canal #1. A saída do *encoder*, apresentada na Figura 3.46(a), OSA 1, indica presença de portadora nos comprimentos de onda 1549; 1550; 1551; 1552 nm, e ausência de portadora nos comprimentos de onda 1549,5; 1550,5; 1551,5; 1552,5 nm, ou seja, implementando um código 10101010. A saída do decodificador principal na Figura 3.47(b), OSA 6, ilustra os comprimentos de onda implementando o mesmo código, enquanto a saída do decodificador complementar (c), OSA 0; implementa o código complementar, ou seja, 01010101.

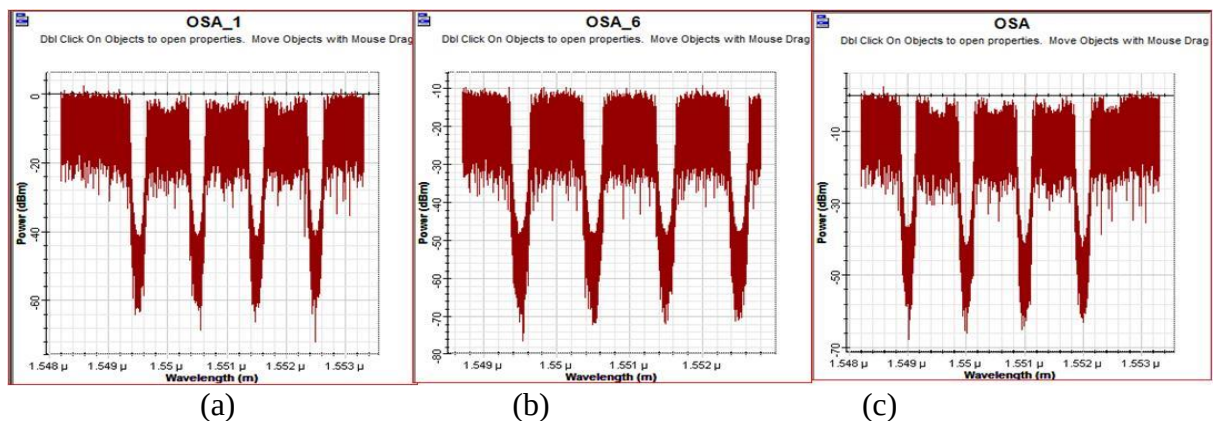


Figura 3.46: Saída do *encoder* OCDMA CH #1 (a); Saída do decodificador principal do CH #1 (b); Saída do decodificador complementar do CH #1 (c)

Para os demais canais, segue-se o mesmo processo, diferenciando-se pelo código utilizado, o qual determina a distribuição dos comprimentos de onda. Assim, tem-se para o

canal #2, que opera com o código 1100110011, os comprimentos de onda ilustrados na Figura 3.47 (a), 1549; 1549,5; 1551; 1551,5 com portador a presente (condição “1”) e portadora ausente nos comprimentos de onda 1550; 1550,5; 1552; 1552,5 (condição “0”). Para o canal #3, que opera com o código 11110000, os comprimentos de onda ilustrados na Figura 3.47(b), 1549; 1549,5; 1550; 1550,5 com portador a presente (condição “1”) e portadora ausente nos comprimentos de onda 1551; 1551,5; 1552; 1552,5 (condição “0”).

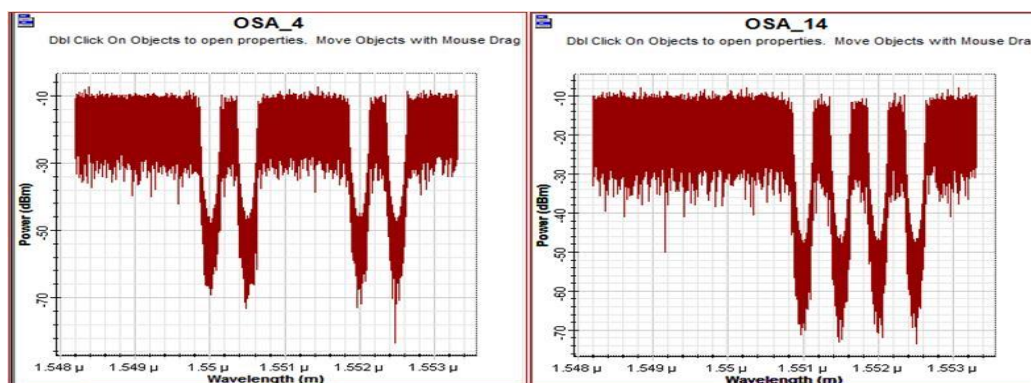
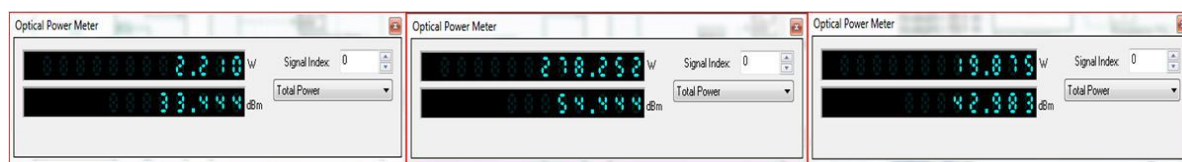


Figura 3.47: Saída do encoder OCDMA #2 (a); Saída do encoder OCDMA # 3 (b)

A análise do orçamento de potência do enlace foi realizada através das medidas apresentadas na Figura 3.48, obtidas dos medidores de potência óptica inseridos nos pontos associados. Têm-se, então, na Figura 3.48 (a) a potência na saída do combinador, ponto que se considerou a entrada da rede ODN. Na Figura 3.48 (b), têm-se a potência na saída da rede ODN, então permitindo a determinação do orçamento de potência pela diferença das leituras, assim apresentando um ganho de 21 dB. Sabe-se que não é comum nas redes PON se ter um ganho de potência no enlace, aqui somente obtido graças à utilização de um amplificador óptico; entretanto, o processo de simulação demonstrou degradações de qualidade inaceitáveis. Cabe ressaltar que a razão de o nível absoluto destas medidas (obtidas com o medidor de potência) ser considerado alto é decorrente do somatório das potências individuais dos comprimentos de onda que compõem os sinais de transmissão, o que pode ser comprovado pelas medidas anteriormente obtidas com os analisadores de espectro.

Considerando a importância do nível na entrada do decodificador, de forma a garantir a compatibilidade com a sua sensibilidade, têm-se a leitura desta potência em (c).



(a) (b) (c)

Figura 3.48: Potência de entrada na ODN (a) saída da ODN (b) Entrada do decoder (c)

Finalizando a análise dos resultados, têm-se a avaliação da qualidade do sinal recebido, através do diagrama de olho e da medição da taxa de BER.

Foi observada uma diferença de desempenho do canal #1 (usuário 1) para o canal #2 (usuário 2), cuja causa está relacionada com o código atribuído ao canal. O código alternado 10101010 possui uma interferência mútua maior que o código 11001100, razão das leituras da taxa de BER de  $1.1 \times 10^{-9}$  e  $6.7 \times 10^{-12}$ , respectivamente. O diagrama de olho apresentado na Figura 3.49, também confirma as leituras anteriores, considerando os valores ilustrados em (a) e (b).

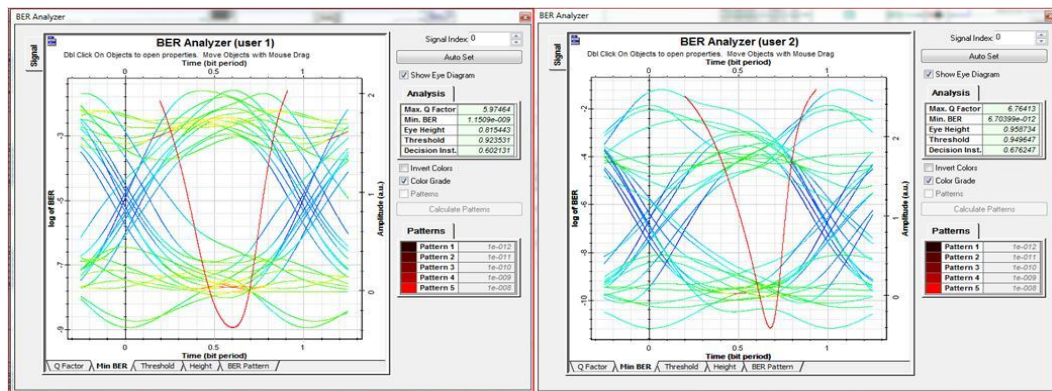


Figura 3.49: Diagrama de olho e BER do canal #1 (a) e do canal 2 (b)

Fonte das Figuras 3.37 a 3.49: Optisystem

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A busca por redes de transmissão capazes de transportar grandes quantidades de informação, quer seja na diversidade de canais e/ou na capacidade inerente a cada um deles, está cada vez mais presente e intensa no mercado de telecomunicações. Tem-se, atualmente, disponível para o transporte destas informações entre as estações das operadoras certa quantidade de tecnologias que geram grande variedade de soluções. Dentre elas podem ser destacadas as redes metro-ethernet, operando a taxas de Gbp/s; a solução DWDM, já com sistemas de 160 *transponders* de 40 Gbp/s; e a recente rede OTN, que, utilizando-se da plataforma DWDM, promove uma configuração em malha, interligando todas as estações nas mais diversas interfaces elétricas ou ópticas.

De forma a possibilitar que este benefício seja estendido às redes domiciliares, incluindo o mercado SOHO, urge o desenvolvimento e implantação de redes de última milha, que possam, também, transportar quantidades de informação compatíveis com as atuais aplicações multimídia.

Após análise sistemática e cuidadosa dos dados apresentados, e mantendo-se o foco na relação custo benefício, ratificou-se que as redes PON e suas variantes são as mais adequadas, devido às suas características de capacidade e desempenho. Dentre outros de menor destaque, os dois principais critérios utilizados que balizaram esta afirmativa foram a distância da última milha necessária ao atendimento e a necessidade de largura de banda de transmissão para as aplicações atuais.

Todavia, considerando as variações das redes PON (GPON, WPON e OCDMA PON), decorrentes da aplicação de distintas técnicas de múltiplo acesso, torna-se



necessária uma avaliação criteriosa de cada uma delas em relação ao escopo de cada projeto.

Em sequência, é apresentada na Tabela 4.16 a síntese das características e desempenho de cada uma dessas variações, incluindo suas combinações, com o objetivo de fornecer uma referência que permita uma análise preliminar da utilização de cada tecnologia relacionada às exigências de cada projeto.

Tabela 4.16: Síntese dos resultados obtidos nos testes e simulações

|                                                | Parametros analisados                                                  | GPON<br>[ Teste de campo ]        | WPON<br>[Simulação]                | OCDMA PON<br>[Simulação]      | GPON&WPON<br>[Simulação]                           | WPON & OCDMA<br>PON [Teste<br>experimental ]    |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Q<br>U<br>A<br>N<br>T<br>I<br>D<br>A<br>D<br>E | Distancia máxima do enlace                                             | Até 20 Km                         | 20 Km                              | 20 Km                         | 60 km                                              | 100 km                                          |
|                                                | Orçamento de potencia                                                  | 28 db                             | 18 db                              | 21 db de ganho                | 7.56 db (1ª seção)<br>14 db ( 2ª seção)            | 8 db                                            |
|                                                | Quantidade de usuários simultaneos                                     | 32                                | 8                                  | 7                             | 128                                                | 12                                              |
|                                                | Taxa maxima transmitida simultaneamente por usuário sentido UP(Mhz)    | 37,50                             | 10 Gbps                            | -                             | 10 Gbps                                            | 10700 M                                         |
|                                                | Taxa máxima transmitida simultaneamente por usuário sentido Down( Mhz) | 78,13                             | 10 Gbps                            | 10 Gbps                       | 10 Gbps                                            | 10700 M                                         |
|                                                | Taxa de erro obtida                                                    | 10 E-10                           | 1.37 x 10 E-10(pior caso)          | 1 x 10 E-9 /<br>6.7 x 10 E-12 | 3.9 x 10E -7(upstream)<br>6.7 x 10E-15(downstream) | 10 E-9                                          |
|                                                | Latência ( RTD)                                                        | 666 µs(média)                     | ND                                 | ND                            | ND                                                 | ND                                              |
|                                                | Throughput                                                             | 100%                              | ND                                 | ND                            | ND                                                 | ND                                              |
|                                                | Frame Loss                                                             | 0%                                | ND                                 | ND                            | ND                                                 | ND                                              |
|                                                | Diagrama de olho                                                       | ND                                | 7.7 x 10 E-5 a.u.                  | 8.1 x 10E-5 a.u               | 3.9 x 10E-6                                        | ND                                              |
| Q<br>U<br>A<br>L<br>I<br>D<br>A<br>D<br>E      | Escalabilidade                                                         | P/10 GPON<br>(Necessario OLT/ONU) | Possivel com novos $\lambda$       | Possivel com novos codigos    | Possivel com novos $\lambda$                       | Possivel com novos $\lambda$ e<br>novos codigos |
|                                                | Segurança da informação                                                | Deficiente                        | Deficiente                         | Eficiente                     | Deficiente                                         | Eficiente                                       |
|                                                | Sintonia da ONU                                                        | Não necessario                    | Estrutura AWG / Laser<br>colorless | Não necessário                | Dependendo da config.<br>será necessario           | Dependendo da config.<br>será necessario        |
|                                                | Interferência mútua entre canais                                       | Não observado                     | Observado degradação<br>de 3 db    | Ponto critico                 | Depende do espaçamento                             | Depende do<br>espaçamento                       |
|                                                | Características gerais                                                 | Assimetrico                       | bidirecional<br>Simetrico          | unidirecional                 | bidirecional<br>Simetrico                          |                                                 |
|                                                | Padronização                                                           | Ok                                | Em desenvolvimento                 | Em estudo                     | Em desenvolvimento                                 | Em estudo                                       |

Considerando que a principal característica das redes PON é o fato de não utilizarem amplificadores ópticos, observa-se uma limitação de distância em torno de 20 km, para as redes GPON e WPON, de forma a atender ao orçamento de potência. Na verdade, tem-se uma pequena margem, quando se utiliza diferentes classes para os transmissores.

Todavia, para as redes híbridas e para a OCDMA, obtiveram-se distâncias maiores, devido à utilização de amplificadores de linha, no lado da operadora. Especificamente no caso do OCDMA, em decorrência do processo intrínseco de multiplexação e múltiplo acesso, tem-se um maior valor absoluto de potência, decorrente do somatório das potências individuais dos canais, conforme se pode comprovar nas simulações.

Quanto ao número de usuários por ramo, nota-se que somente a rede GPON não possui escalabilidade, ficando limitada a 32. Cabe ressaltar, no entanto, que uma mesma OLT possui varias interfaces de saídas para rede ODN (tipicamente quatro), o que, de certa forma, possibilita expansões limitadas. Nas redes WPON e OCDMA, o aumento do número de usuários na mesma rede ODN, é feito de forma mais sistemática, a despeito dos números apresentados na Tabela 4.16, que retratam apenas condições de teste, não necessariamente limitando a capacidade de atendimento.

Para a taxa de transmissão, as redes OCDMA e WPON oferecem uma maior capacidade, em tráfego simétrico tanto ascendente, quanto descendente, alcançando 10 Gbp/s, enquanto que a rede GPON se restringe a valores bem menores e em tráfego assimétrico. No caso em que se deseje um aumento desta taxa em GPON, o número de usuários por ramo deverá ser reduzido.

As redes OCDMA apresentaram o melhor desempenho em termos de taxa de erro e diagrama de olho, considerando os dados obtidos na simulação, enquanto que as redes GPON e WPON apresentaram para a taxa de BER desempenhos similares da ordem de  $10^{-10}$ , compatível com as recomendações ITU-T.

As características de latência e *throughput* são muito dependentes dos protocolos utilizados; sendo assim, as redes GPON são as mais afetadas, razão pela qual, a Tabela 4.16 somente indica os valores associados a ela, que não comprometem o desempenho esperado.

Adicionalmente, pelo estudo de caso relativo à implantação deste projeto na Embratel, foi possível atestar o bom desempenho deste tipo de sistema, tanto no nível dos parâmetros quantitativos quanto dos qualitativos, especialmente os relativos à disponibilidade.

Cabe ressaltar apenas sua limitação na escalabilidade, capacidade, e segurança da informação, o que pode ser minimizado pela sua conjunção com outra rede, neste caso, a rede WPON.

Todavia, dentro em breve será necessário um *upgrade* por mais capacidade nos sistemas GPON, decorrente das novas exigências do mercado em função das aplicações. Neste caso, estão disponíveis duas opções: a migração para a rede 10 GPON, que amplia a taxa do agregado; ou a sua combinação com a técnica WPON. A escolha entre as duas, basicamente, poderá ser definida pela necessidade ou não de se garantir a escalabilidade, de modo a permitir a expansão do sistema.

Cabe ressaltar que a aplicação da técnica original WPON com lasers sintonizados, somente se justificaria em caso de uma rede ponto a ponto com grande diversidade de canais. Em uma rede estrela, torna-se fundamental a utilização de técnicas que permitam operar com lasers que não possuem um comprimento de onda específico (*colorless*).

O presente estudo apresentou e avaliou todas as variações das redes PON, desde as que já podem ser consideradas como legado, por exemplo, as redes APON e BPON, aquelas que estão em operação comercial, especialmente a rede GPON, e as que ainda estão em fase de desenvolvimento e regulamentação, como é o caso das redes WPON e OCDMA PON.

Pelo que foi apresentado, pode-se concluir a viabilidade imediata da migração das redes metálicas de última milha para a configuração GPON, considerando a relação custo- benefício mais adequado, além do fato de utilizar tecnologia de baixa complexidade, o que facilita tanto a implantação quanto a operação do sistema. Cabe ressaltar apenas sua limitação de escalabilidade, capacidade, e segurança da informação, o que pode ser minimizado pela conjunção com outra rede, neste caso, a rede WPON.

Quanto à proposta da rede OCDMA, apesar de desempenho superior em relação às outras topologias, sua implantação em campo estará condicionada à conclusão da padronização pelos órgãos competentes, de forma a permitir que os fabricantes possam desenvolver produtos interoperáveis, e com alguns parâmetros mais bem desenvolvidos, principalmente a interferência mútua entre canais (MUI), que aumenta com o número de usuários, e as distorções RIN, GVD e PMD mais críticas em enlaces longos. Todavia, não há dúvidas quanto à sua capacidade, quando se analisa sua utilização em conjunto com a configuração WPON, atingindo taxas agregadas de até 140 Gbp/s, suficiente para suportar toda e qualquer aplicação multimídia de que se tem notícia, incluindo aquelas ainda em estágio de desenvolvimento como o caso da transmissão de vídeo em HD 3D 4K, ou seja, TV com resolução quatro vezes maior que o HD atual e ainda em 3D.

Acredita-se, então, que o presente trabalho pode ser muito útil na determinação da estratégia de crescimento e migração de tráfego das operadoras, fornecendo dados qualitativos e quantitativos para todas as variações das redes PON.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Face ao exposto, acredita-se que a tecnologia GPON se encontra em sua fase “madura” de utilização, por conseguinte não demandando novas investigações.

Entretanto as tecnologias WPON e OCDMA PON, principalmente esta última, requer maiores estudos, de forma a melhorar seu desempenho e reduzir os custos associados de OPEX e CAPEX.

Especificamente, no WPON, os sistemas reflexivos abordados no capítulo 2, merecem um estudo mais detalhado, o que pode ser feito com o aplicativo Optisystem, utilizando os próprios componentes existentes em sua biblioteca.

Quanto ao OCDMA, o presente estudo apresentou uma simulação de um codificador de uma única dimensão, todavia os sistemas de duas e três dimensões, apresentam desempenhos teóricos extremamente relevantes, porém ainda não implementados comercialmente em larga escala.

Assim, tem-se como sugestão para a continuidade do presente trabalho, o desenvolvimento de sistemas WPON reflexivos e de sistemas OCDMA de duas e três dimensões, podendo se utilizar o aplicativo Optisystem. No caso do OCDMA será necessário o desenvolvimento de novos componentes para inclusão na biblioteca do aplicativo, razão pela qual, recomenda-se iniciar pelos sistemas de duas dimensões.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, G. P, Fiber-Optic Communication Systems, **Multichannel Lightwave Systems**, Wiley , New York , 1997.

ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações. **Regulamento do Serviço de Comunicação Multimídia - SCM**. 2011. Disponível em < <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibir/PortalInternet.do#>> Acesso em outubro/2012.

ANDREWS, J. G.; MUHAMED, J. Fundamentals of WiMAX: Understanding In: **BroadBand Wireless Networking**, Prentice Hall Commun. Engineering and EmergingTech.2007.

APPROACH Corporate – Comunicação Estratégica Empresarial. In. **Artigo CTC/PUC-Rio desenvolve técnica inédita de interatividade para filmes**. Disponível em [http:// WWW . approach . com . br/PT /clientes/releases /1342 /CTC/PUC \\_Rio\\_desenvolve \\_tecnica\\_inedita\\_de\\_interatividade\\_para\\_filmes.html](http://WWW.approach.com.br/PT/clientes/releases/1342/CTC/PUC_Rio_desenvolve_tecnica_inedita_de_interatividade_para_filmes.html) Acesso em out/2012.

REGGIANI A.E. “Tendencias em redes opticas de acesso e tecnologia GPON-CPQD,” Fundação CPQD.,Disponível em <http://www.cpqd.com.br/>, Acesso em maio 2008

BERNARDO, J.C.C.M. “**Concepção e Projeto de Redes de Acesso/Metro Opticas Híbridas**”. Dissertação de mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.

CHEING-HONG, L.; WU, J. “Spectral Amplitude Coding Optical CDMA System using Mach-Zehnder Interferometers”. In: **Journal of Lightware Technology**, v. 23, n. 4, April 2005.

CIP TECHNOLOGIES,(JAN 2008) “WDM-PON Technologies”. [on line]. Disponível em: [http://www.ciphotonics.com/PDFs\\_Jan08/WPON\\_White\\_Paper\\_v10.pdf](http://www.ciphotonics.com/PDFs_Jan08/WPON_White_Paper_v10.pdf). Acesso em: 8 out.2012.

LIVRAMENTO C.M., “GPON/FTTH,”. Dissertação de Mestrado, Centro de Competências Exactas e de Engenharia - Universidade de Madeira, Portugal, 2008/2009.

ALCATEL-LUCENT(2008), “Enhancing PON capacities using the wavelength domain,”[on line], Disponível em: <http://www.itu.int/ITU-T/worksem/ngoas/index.html>., Acesso em: 01 março 2012

PENON, J.; EL ZAHN, Z. "Spectrum Amplitude coding SAC-OCDMA Passive Optical Networks". Universidade LAVAL, In: **Conference Information et Reseautage au COPL**, Canada, Décembre 2006.

ESRI, "ArcMap" [on line], Disponivel em < <http://video.esri.com/tag/193/arcmap>, Acesso em 05 março 2012

GHIRINGHEHELLI F, ZERVAS M.N, "BER and total throughput of asynchronous DS-OCDMA/WDM systems with Multiple User Interference". , Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, Highfield, SO17 1Bj, United Kingdom, 2003.

FERNANDES.L.F.C."WDM",Teleco,(2005),[on line], Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwdm>. Acesso em: 01 março 2012.

FERNANDES P.R.T et al, "Construção de rede de acesso Embratel- Projeto PON", Orientação técnica do Departamento de Tecnologia e Qualidade de rede, Disponível na intranet da Embratel, Acesso em novembro 2011.

FRIGYES, I. "CDMA in Optics". IEEE Nine<sup>th</sup> International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, (2006),[on line] Disponível em <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/>, Acesso em dez 2011.

FURUKAWA, "FTTH – Rede à prova do futuro",Departamento Tecnologia Networking Furukawa,[on line], Disponivel em <http://www.furukawa.com.ar/pls/portal/docs/> , Set 2007, Acesso em abril 2011.

ERICSON, "Full Service BroadBand with GPON" (2008), Disponível em [www.teleco.com.br/tutoriais](http://www.teleco.com.br/tutoriais), Acesso em out/2012.

GONÇALVES, Marcos André. **Projeto Sagres** - Sistema Automatizado de Gerência de Rede Externa. In: CPQD- Centro de Pesquisa e Desenvolvimento.1998. Disponível em <http://CPQD.org.br>> Acesso em out/2012.

ENCYDIA,"Rede Óptica Passiva com Capacidade de Gigabit PON", 2005. Disponível em: <http://pt.wikiligue.com/es/GPON>. Acesso em: 01 março 2012

GREEN Jr., P. E. "Fiber to the Home: The New Empowerment". In: **Wiley-Interscience publication, John Wiley & Sons Inc.** 2006.

GROBE K., "Bringing WDM - PON to market", Gazetta byte - Telecom Datacom. 2010

HAI-HAN-LU et al. “Bidirectional Hybrid DWDM-PON for HDTV/Gigabit Ethernet/CATV Applications”. In: **ETRI Journal**, v. 29, n. 2, April 2007. Disponível em: <http://etrij.etri.re.kr/Cyber/Download/PublishedPaper/2902/29-02-04.pdf> , Acesso em julho 2011.

HARBOE, P. B.; SOUZA, J. R. Free Space Optical Communication: a Feasibility Study for Deployment in Brazil. In: **Journal of Microwaves and Optoelectronics**, vol. 3 (4), 58-66. 2004.

CANO I. et al, “Dimensioning of ofdma pon with non preselected independent ONUs source and wavelength control fth network”. Universitat Politecnica de Catalunya, UPC (2011). Disponível em <http://www.ict-accordance.eu/>, Acesso em jan 2012

IEEE Standards Association (IEEE-SA). **Banda larga sem fio de redes metropolitanas (MANs)**. Disponível em <[Standards.ieee.org/ about/get/802/802.16.html](http://Standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html)> Acesso out/2012.

ITU-T Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): In: **Series Recommendation G.984**, Physical media dependent (PMD) layer specification,” Amendment 2. 2008.

ITU – T. Data networks, open system communications and security. In: **Recomendações ITU-T. Terminais para serviços telemáticos** Disponível em <<http://www.itu.int/rec/T-REC-T.800-200208-I>>. Acesso em out/2012.

ITU – T. Data networks, open system communications and security. In: **Sistemas audiovisuais e de multimídia**. Disponível em [www.itu.int/rec/T-REC-H.262](http://www.itu.int/rec/T-REC-H.262). Acesso em out/2012.

ITU – T. Data networks, open system communications and security. In: **Sistemas audiovisuais e de multimedia**. Disponível em <[www.itu.int/rec/T-REC-H.264](http://www.itu.int/rec/T-REC-H.264)> Acesso em out/2012.

ITU T H 262, MPEG 2. Disponível em: <http://www.ITU.int/em/ITU-T/publications/pages/recs>. Acesso em: 01 março 2012 ITU T H264, MPEG 4. Disponível em: <http://www.ITU.int/em/ITU-T/publications/pages/recs>. Acesso em: 01 março 2012

ITU-T 80, JPEG. Disponível em: <http://www.ITU.int/em/ITU-T/publications/pages/recs>. Acesso em: 01 março 2012

ITU-T G984, GPON. Disponível em: <http://www.ITU.int/em/ITU-T/publications/pages/recs>. Acesso em: 01 março 2012

KARBASSIAN M.M., “**Design and analysis of spreading code and transceiver architecture for optical CDMA networks.**” Tese de Doutorado. University of Birmingham, College of Engineering and Physical Science School of Electronic Electrical and Computer Engineering, 2009.

KITAYAMA K.I. et al, “OCDMA: A practical solution path to new generation symmetric bandwidth access system”. IN J.Lightwave Technol.,vol.24,No.4,pp.1654-1662,2006.

KRAMMER, G.; PESAVENTO G.,”**Ethernet Passive Optical Network(EPON): building a next generation optical access network**”. IEEE Commun. Mag., vol. 40, 66-73. 2002.

LUCENA, C.J.P., “**Automatic Video Editing for Video-Based Interactive Storytelling**”.PUC Monografias em Ciência da Computação, No. 17/11 ISSN: 0103-9741. 2011

MARTINS L. et al., “Fornecimento de acesso em banda larga com solução híbrida GPON,Wimax,WiFi-Ad Hoc e Mesh”. IN: <http://www.cpqd.com.br/>, 2005.

MEDEIROS, E., “**Tráfego na Internet deve crescer quase 30% até 2016**”, Disponível em <http://www.tecmundo.com.br/internet/24384-trafego-na-internet-deve-crescer-quase-30-ate-2016.htm#ixzz2CaHw8p5q>. Acesso out/2012.

MOKARZEL M.P., “Redução do tempo de Zapping em serviços IPTV sobre redes GPON utilizando vídeos encavaláveis”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo (USP), 2010.

NETFLIX, Inc. NASDAQ: NFLX. Disponível em <[https://signup . netflix. com/Media Center](https://signup.netflix.com/MediaCenter)>. Acesso em out/2012.

Optical network design considerations for PON, 2005. Disponível em: [www.alcatel.com](http://www.alcatel.com). Acesso em: 01 março 2012

Optiwave –“**Tutorial Optisystem**”. Disponível em <[http://www.optiwave.com/products / system\\_ overview. html](http://www.optiwave.com/products/system_overview.html)>. Acesso em: abril 2012

OVUM Consulting, “**Estudo sobre o impacto das Redes de Próxima Geração no mercado**”. (2008). Disponível em < [HTTP://WWW.anacom.pt/streaming/estudo\\_ngn\\_](http://WWW.anacom.pt/streaming/estudo_ngn_) , acesso em out/2012.



WIKIPEDIA, "Passive Optical Network", (2009), Disponível em: <http://pt.wikilingue.com/es/GPON>. Acesso em: 01 março 2012

PFEIFFER T. "Enhancing PON capacities using the wavelength domain". Alcatel Lucent , IN Joint ITU/IEEE workshop on next generation access, Geneva 2008

PHAM A.T. et al. "Spectral amplitude encoding optical code division multiplexing system with a heterodyne detection receiver for broadband optical multiple access networks". In: **Journal of optical networking** , vol 4 No 10 pp 621-631.paper. 2005.

PINHEIRO, J. M. S. "**Redes Ópticas de Alto Desempenho**". Disponível em: <[http://www.projetoderedes.com.br/artigo\\_arquitetura\\_para\\_rede\\_acesso.php](http://www.projetoderedes.com.br/artigo_arquitetura_para_rede_acesso.php)> Acesso em: 20 de outubro 2012.

PRAT, J. et al. "New FTTH Architectures for NG-PON-2". In: Research and Education Laboratory of Information Technologies, Athens.(2011). Disponível em: [www.ict-accordance.eu/publications](http://www.ict-accordance.eu/publications), Acesso em: 01 março 2012.

RAHMAN M.S.A. et all. "Development of Low cost OCDMA encoder based on Arreyd Waveguide Gratings(AWG's) and optical switches". IN: **World Academy of Science,Engineering and Technology** , vol 46 pp 657-660, May 2008.

ROSOLEM, J.B. et al. "Arquiteturas baseadas em WDM para as próximas redes PON" IN: **Cad. CPqD Tecnologia, Campinas**, v. 6, n. 1, p. 65-76, jan./jun. 2010. Disponível em <[http://www.cpqd.com.br/cadernosdetecnologia/Vol6\\_N1\\_jan\\_jun\\_2010/pdf/artigo6.pdf](http://www.cpqd.com.br/cadernosdetecnologia/Vol6_N1_jan_jun_2010/pdf/artigo6.pdf)> Acesso em out/2012.

MUNDOGEO , "SAGRE um elemento unificador em uma época de mudança"(1999), Disponivel em: <http://mundogeo.com/blog/1999/06/02/sagre-um-elemento-unificador-em-uma-epoca-de-mudancas/>, Acesso em março 2011

SALLES, E.R. et al "Aplicativo multimídia - SIG para disseminação da base de dados geoambientais do Estado de São Paulo", In: **Gis Brasil 98, Congresso e Feira para usuários de Geoprocessamento da América Latina**, 4., Sagres Editora, Curitiba-PR, 1998.

SANTOS A.F., "Algoritmo para alocação de banda em redes de acesso GPON.", Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Eletrica, Universidade de São Paulo (USP), 2010.

SANTOS R.V.B., "Análise de sistemas CDMA ópticos", Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2006.

SANCHES A.L., "Análise de redes ópticas de alta velocidade baseados na tecnologia CDMA e códigos bidimensionais", Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo, 2010.

SHIN D.J. et al. Hybrid WDM/TDM PON for 128 subscribers using  $\lambda$  selection free transmitters Optical Society of America. OCIS codes: (060.4510) white paper 2004.

SHIN, D.J. et al. "Hybrid WDM/TDM PON for 128 subscribers using a selection free transmitters". IN: Journal of Lightware Technology,(2005), Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/>, Acesso em maio 2011.

SILVA, G.E.V. "Estudo de topologias para redes WDM-PON", Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Eletrica, Universidade de São Paulo (USP), 2010.

SILVERIO, A. "Orientação Técnica – Atendimento à migração de circuitos em redes de terceiros > 512 Kbps", Departamento de Engenharia da Embratel, 2011.

TAKEUTI, Paulo. Projeto e dimensionamento de redes ópticas passivas. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), 2005.

Traffic management for testing triple-play services, 2006. Disponível em: [www.altera.com](http://www.altera.com). Acesso em: Abril 2012.

VILALBA.T., "Distribuição de divisores de potencia em redes ópticas passivas utilizando algoritmos genéricos". Dissertação de mestrado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo, 2009

WU, B.B.; NARIMANOV, E.E. "A Method for secure communications over a public fiber optical network". IN: **Optical Express** 3738, v.14, n.9, May 2009.

Xu Wang , Taro Hamanaka, Tetsuya Miyazaki , Gabriella Cincotti. "OCDMA over WDM Transmission". IN: **ICTON 2007 pp 110- 113**.

YEGNANARAYANAN, S.; BHUSHAN, A.S.; JALALI, B. "Fast Wavelength hopping time spreading encoding/decoding for optical CDMA". IN: **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 12, n. 5, May 2000.

ZHU Benyuan. **Entirely passive coexisting 10G-PON and GPON compatible reach extender using Raman amplification.** Disponível em <[Optics Express, Vol. 20, Issue 3, pp. 2290-2296 (2012); <http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.002290>> Acesso em out/2012.

## **APÊNCICE**

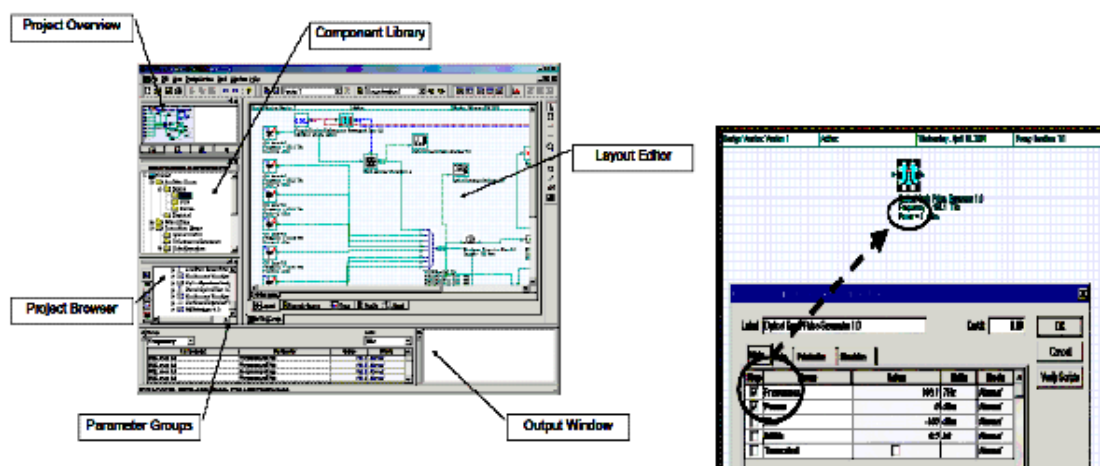
## APLICATIVO OPTISYSTEM

Este aplicativo disponibiliza uma grande variedade de circuitos ou módulos nas áreas de transmissão analógica ou digital, como por exemplo: moduladores e demoduladores, transmissores e receptores, amplificadores, atenuadores, conversores, filtros, dentre outros.

Adicionalmente possibilita a avaliação de desempenho dos sistemas criados, pois possui diversas fontes de geração de sinais de teste, quer sejam analógicos ou digitais, elétricos ou ópticos, todos com diversas possibilidades de configuração.

Na verdade, todos esses componentes permitem variação dos seus principais parâmetros, permitindo assim o desenvolvimento de várias condições de teste, tornando o processo de simulação bastante versátil.

A Figura abaixo fornece uma visão geral destas funcionalidades, ilustrando a área de trabalho onde se produz o projeto, e um exemplo da tela de configuração dos componentes/módulos.

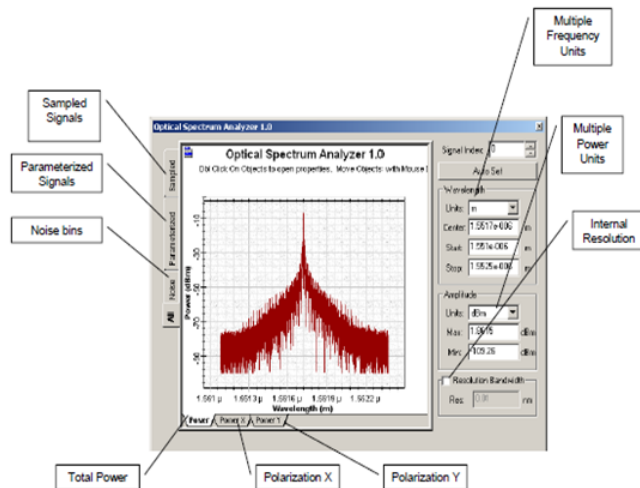


Exemplos da tela do projeto (esquerda) e configuração(direita).

A visualização dos resultados pode ser apresentada no domínio da frequência, no domínio do tempo, ou no domínio dos dados, aqui também para sinais elétricos ou ópticos. Assim além dos tradicionais analisadores de espectro; de forma de onda (osciloscópio) e os

analísadores de dados (*BER analyser*), o aplicativo oferece outros, como analisadores dos parâmetros S, analisadores de constelação, analisadores WDM, diagrama de olho, por exemplo.

As Figuras a seguir ilustram algumas das interfaces gráficas disponíveis.



#### Características

- ✓ Análise no domínio da frequência, configurado com escala vertical logarítmica (dbm) e horizontal em comprimento de onda (nm) ou frequência(Thz).
- ✓ Configuração das escalas em manual ou automático dependendo da necessidade de melhor visualização.
- ✓ Configuração da tela para potência total (Total Power) e todos os sinais (ALL), de forma a apresentar a composição real do sinal avaliado.

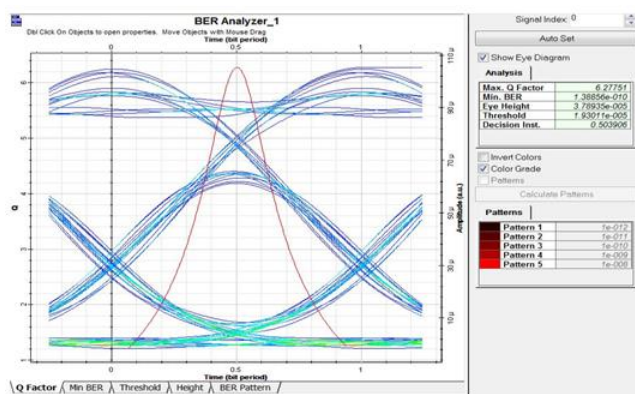
Tela do analisador de espectro.



#### Características :

- ✓ Potências em escalas lineares (watts) e logarítmicas (dbm).

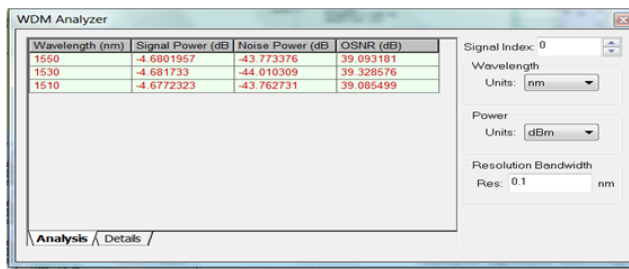
Tela do medidor de potência óptico.



#### Características utilizadas

- ✓ Medida da relação de erro de bit (Bit Error Rate – BER)
- ✓ Medida da altura do diagrama de olho
- ✓ Gráfico de amplitude x tempo
- ✓ Visualização do diagrama de olho
- ✓ As outras medidas não foram utilizadas

Tela do analisador de BER / Diagrama de olho.



#### Características

- ✓ Medidas da potência do sinal e do ruído e sua consequente relação S/N
- ✓ Opera com unidade de potência linear e logarítmica
- ✓ A configuração da resolução de banda (resolution bandwidth), permite um melhor processamento da portadora modulada.

Tela do analisador WDM.

Para facilitar o uso dessas funcionalidades, o aplicativo utiliza uma interface gráfica (GUI – *Graphical User Interface*) extremamente “amigável” com o usuário, baseados em controles utilizados tradicionalmente nos aplicativos gráficos existentes.

Possui ainda diversas interfaces com outros sistemas, quer sejam para processamentos mais complexos, como por exemplo: o MATLAB e o C++, ou com aqueles mais simples como o Excel.

Vários parâmetros podem ser configurados nos circuitos, módulos, geradores de sinais e visualizadores, como por exemplo: potência, frequência, fase, vários tipos de ruídos, relação sinal-ruído, etc., permitindo assim uma maior versatilidade nas simulações.

Além dos componentes discretos citados acima, tem-se ainda disponível uma vasta biblioteca de diferentes topologias ou projetos, desde simples caracterização de determinados componentes ou sistemas, como por exemplo, os diversos tipos de amplificadores ópticos, as variações das modulações e multiplexações, quanto outras mais complexas aplicadas a caracterização de redes de transmissão de alta capacidade.

Serão apresentados a seguir o diagrama original de cada uma das topologias desenvolvidas :

- Topologia WPO
- Topologia Híbrida: Wpon + GPON
- Topologia OCDMA PON

Considerando que as mesmas foram obtidas por um processo de copia de imagem, a resolução foi prejudicada, principalmente quando comparada com a impressão original do desenho a partir do próprio aplicativo.