

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

Wagner Luiz Alexandre Rodrigues

Proposta de arquitetura de rede de fibra óptica para aproveitamento de infraestrutura na
transição de rede GPON para XGPON

Fortaleza, Ceará

2023

Wagner Luiz Alexandre Rodrigues

Proposta de arquitetura de rede de fibra óptica para aproveitamento de infraestrutura na transição de rede GPON para XGPON

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Internet das Coisas e Redes de Sensores.

Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes

Fortaleza, Ceará

2023

Wagner Luiz Alexandre Rodrigues

Proposta de arquitetura de rede de fibra óptica para aproveitamento de infraestrutura na transição de rede GPON para XGPON

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Internet das Coisas e Redes de Sensores.

Aprovado em: ____/____/____.

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes

Orientador

Prof. Dr.

Convidado 1

Prof. Me.

Convidado 2

Fortaleza, Ceará

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R696p Rodrigues, Wagner.
Proposta de arquitetura de rede de fibra óptica para aproveitamento de infraestrutura na transição de rede GPON para XGPON / Wagner Rodrigues. - 2024.
115 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Jose Wally Mendonça Menezes.

1. GPON. 2. XGPON. I. Título.

CDD 621.382

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela oportunidade de viver, e pelas oportunidades que ele tem me dado todos os dias.

Quero agradecer ao meu pai e minha mãe que sempre acreditaram na minha capacidade, e me ajudaram a se tornar a pessoa que eu sou.

Quero agradecer a minha namorada por ter me apoiado a todo instante a fazer e concluir esse curso de mestrado.

Quero agradecer ao professor Wally pelo apoio, paciência, e por ter acreditado no meu potencial em conseguir terminar esse curso.

"Aqueles que não reconhecem seu verdadeiro eu estão condenados ao fracasso."

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo propor um modelo de projeto no qual permite que as tecnologias GPON e XGPON funcionem ao mesmo tempo, e de uma maneira que facilite a transição de clientes de uma tecnologia para outra, sem que haja grandes investimentos em infraestrutura. Na proposta foram considerados todas as particularidades e limitações de cada tecnologia, que por meio do software *Qgis*, foi permitido coletar valores que mais tarde foram utilizados em testes no software *Optisystem*, permitindo que houvesse a comprovação do modelo proposto. Além disso foram utilizadas equações nas quais ajudaram no sucesso da arquitetura de rede, permitindo que fosse encontrado o limite máximo da distância de atendimento, o que permitiu encontrar os valores nos quais devem ser respeitados para o bom aproveitamento na utilização de duas tecnologias em uma mesma infraestrutura.

Palavras chaves: GPON, XGPON, coexistência, arquitetura, fibra óptica, ONU.

ABSTRACT

This work aimed to propose a project model in which GPON and XGPON technologies can work at the same time, and in a way that facilitates the transition of customers from one technology to another, without having to make large investments in infrastructure. In the proposal, all the peculiarities and limitations of each technology were considered, which through the Qgis software, allowed to collect values that were later used in tests in the Optisystem software, allowing the proposed model to be proven. In addition, equations were used in which they helped in the success of the network architecture, allowing the maximum limit of the service distance to be found, which allowed finding the values that must be respected for the good use of the two technologies in the same infrastructure.

Keywords: GPON, XGPON, coexistence, architecture, fiber optics, ONU.

Sumário

Sumário

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Motivação.....	14
1.2 Objetivo	16
1.3 Estrutura da dissertação.....	18
2 REDES ÓPTICAS PASSIVAS E SUAS TOPOLOGIAS	19
2.1 Redes PON.....	19
2.2 Redes ópticas ponto a ponto e ponto-multiponto.....	20
2.3 Arquitetura GPON	24
2.4 Arquitetura XGPON	26
2.5 Coexistência harmoniosa entre GPON e XGPON: Rumo à conectividade de próxima geração	28
2.6 Largura de banda das redes PON	29
2.7 Alcance de funcionamento das redes PON	30
2.8 Definição da Taxa de Splitagem em Redes PON.....	31
2.9 Meio de transmissão	33
2.10 Comprimentos de onda	34
2.11 Transmissores ópticos.....	35
2.12 Receptores ópticos.....	37
2.13 Enlace óptico.....	41
3 Proposta de modelo de projeto e metodologia para a sua validação.....	44
3.1 Rede de acesso óptica proposta	44
3.2.1 Rede de atendimento	48

3.2.2 Componentes de divisão de sinal óptico: Splitters ópticos	51
3.2.3 Meio de transmissão: Fibra óptica	52
3.3 Cálculo de atenuação	56
3.4 Simulação	62
3.4.1 Qgis	63
3.4.2 Optisystem	67
4 Resultados	71
4.1 Resultados do cálculo de Power Budget	71
4.2 Resultados da simulação	75
4.2.1 Potência óptica	75
4.2.2 Taxa de erro de bits (BER).....	76
4.2.3 Diagrama de olho	77
4.3 Análise do projeto de rede Qgis	80
4.4 Largura de Banda.....	82
4.5 Simulação no Optisystem.....	84
4.6.1 Resultados da simulação da rede com split 1:32 e com distância máxima de atendimento de 4,5 km.	89
4.6.2 Resultados da simulação da rede com split 1:32 e com distância máxima de atendimento de 9 km.	93
4.6.3 Resultados da simulação da rede com split 1:64 e com distância máxima de atendimento de 4,5 km.	96
4.6.4 Resultados da simulação da rede com split 1:64 e com distância máxima de atendimento de 9 km.	100
4.6.5 Teste de simulação de rede com splitter de 1:64 e com distância máxima de até 8km.	103
4.7 Arquitetura consolidada.....	107
5 CONCLUSÃO	110
5.1 Sugestão de trabalhos futuros	112
6 Referências	114

Figuras

Figura 1 - Arquitetura PON.....	20
Figura 2 - Topologia ponto a ponto.....	21
Figura 3 - Topologia ponto-multiponto.....	22
Figura 4 – Downstream e Upstream.....	23
Figura 5 – Arquitetura GPON.....	24
Figura 6 – Arquitetura XGPON.....	26
Figura 7 - Funcionamento de um filtro WDM1r.....	29
Figura 8 - Comprimentos de onda GPON e XGPON.....	35
Figura 9 – Receptores XGPON.....	40
Figura 10 - Arquitetura proposta da rede óptica.....	47
Figura 11 - Caixa de terminação óptica conectorizada.....	50
Figura 12 - Splitter óptico.....	51
Figura 13 – Gráfico de atenuação e dispersão a partir do comprimento de onda das fibras G.652.....	55
Figura 14 - Cálculo das atenuações da arquitetura proposta.....	57
Figura 15 - Rede projetada no Qgis.....	66
Figura 16 - Arquitetura no Optisystem.....	68
Figura 17 - Rede projetada para cálculo da atenuação com taxa de splitagem de 1:64.....	71
Figura 18 - Representação do cálculo das atenuações com utilização do splitter 1x4.....	73
Figura 19 - Estrutura para medição de potência utilizando power meter.....	75
Figura 20 - Diagrama de olho.....	77
Figura 21 - Estrutura para retirada do diagrama de olho no downstream.....	78
Figura 22 - Estrutura para retirada do diagrama de olho no upstream.....	78
Figura 23 - Projeto QGIS.....	79
Figura 24 - Representação da CTO mais distante no projeto.....	80
Figura 25 - Arquitetura montada no Optisystem.....	84
Figura 26 - Representação de ONU GPON no optisystem.....	86
Figura 27 - Representação de ONU XGPON no optisystem.....	86

Figura 28 - Representação dos transmissores das OLTs no optisystem.....	87
Figura 29 - Representação dos receptores da OLTs.....	87
Figura 30 - Downstream GPON.....	89
Figura 31 - Upstream GPON.....	89
Figura 32 - Downstream XGPON.....	91
Figura 33 - Upstream XGPON.....	91
Figura 34 - Downstream GPON.....	93
Figura 35 - Upstream GPON.....	93
Figura 36 - Downstream XPON.....	94
Figura 37 - Upstream XGPON.....	95
Figura 38 - Upstream GPON.....	96
Figura 39 - Downstream GPON.....	97
Figura 40 - Downstream XGPON.....	98
Figura 41 - Upstream XGPON.....	98
Figura 42 - Downstream GPON.....	99
Figura 43 - Upstream GPON.....	100
Figura 44 - Downstream XGPON.....	101
Figura 45 - Upstream XGPON.....	101
Figura 46 - Downstream GPON.....	103
Figura 47 - Upstream GPON.....	103
Figura 48 - Downstream XGPON.....	104
Figura 49 - Upstream XGPON.....	105
Figura 50 – Arquitatura Consolidada.....	106

Tabelas

Tabela 1 - Perda dos splitters mais utilizados na rede de fibra óptica.....	32
Tabela 2 - Potência mínima e máxima de transmissão da OLT GPON.....	36
Tabela 3 - Potência mínima e máxima de transmissão da ONU GPON.....	36
Tabela 4 - Sensibilidade, saturação e <i>power penalty</i> OLT GPON.....	39
Tabela 5 - Sensibilidade, saturação e <i>power penalty</i> ONU GPON.....	39
Tabela 6 - Classes ONU GPON.....	41
Tabela 7 - Classes ONU XGPON.....	42
Tabela 8 – Resultados dos testes.....	110
Tabela 9 – Resultados 8km.....	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPON – Ethernet Passive Optical Network

GE – Gigabit Ethernet

GPON – Gigabit Passive Optical Network

DIO – Distribuidor Interno Óptico

ITU-T – International Telecommunication Union – Telecommunication Sector

MEF – Metro Ethernet Forum

MTBF – Mean Time Between Failures

NAP – Network Access Point

NG-PON2 – 40-Gigabit-capable Passive Optical Networks

ODN – Optical Distribution Network

OLT – Optical Line Terminal

ONT – Optical Network Terminal

ONU – Optical Network Unit

PON – Passive Optical Network

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é discutida a motivação central deste trabalho: uma solução a baixo custo para os provedores para suprir a crescente demanda da sociedade por banda de internet. É apresentado a ideia de integração das tecnologias GPON e XGPON, explorando como essa coexistência pode ser uma solução para suprir essa demanda em ascensão.

1.1 Motivação

A comunicação sempre foi necessária para a sobrevivência do ser humano e, desde cedo, eles desenvolvem técnicas para se comunicar, permitindo assim que vivam de forma conjunta. Assim desenvolveram-se as telecomunicações que facilitam a forma como as pessoas se comunicam, podendo se conectar de qualquer parte do mundo. Os sistemas de telecomunicações estão presentes em várias ações do nosso cotidiano. Por exemplo, quando mantemos uma conversa telefônica, quando assistimos a um filme na televisão, quando ouvimos uma música no rádio, quando enviamos um *e-mail* para alguém ou quando tiramos um extrato em um terminal de automação bancária, estamos utilizando um sistema de telecomunicações.

A fibra óptica surgiu como uma solução viável para a transmissão de banda larga de internet. Atualmente, a fibra óptica é muito empregada em redes de longa distância e metropolitanas, sendo constantemente utilizada para redes de acesso a internet, pois com sua diversidade de topologias e tecnologias, se apresentam como uma alternativa interessante às tecnologias passadas que eram baseadas em cobre ou cabo coaxial.

Com o avanço na utilização da fibra óptica foram criadas tecnologias que fossem capazes de comercializar a internet utilizando esse meio de transmissão, essas tecnologias ficaram conhecidas como redes PON (*Passive Optical Networks*). Devido ao crescimento das tecnologias foi necessário que fosse criada uma forma de padronizar e normatizar essas tecnologias para que diferentes países pudessem compartilhar dos equipamentos criados, e assim surgiu a ITU-T (*Telecommunication Standardization Sector*), que é uma área da União

Internacional de Telecomunicações (ITU) que é responsável por padronizar tecnologias do setor de telecomunicações do mundo inteiro.

Por meio da IEEE 802.3ah a ITU-T criou normas para o que seria uma nova rede PON, a tecnologia EPON (*Ethernet Passive Optical Networks*) que surgiu no mercado de internet como uma solução para oferecer taxas de download e upload maiores que tecnologias via rádio ou cabo metálico.

No ano de 2002 a ITU-T desenvolveu uma nova tecnologia para redes PON, chamado GPON (*Giga-bit Passive Optical Network*). Essa nova rede veio com o objetivo de fornecer maior largura de banda em relação a tecnologia de acesso óptico anterior, propondo uma especificação adequada sobre as tecnologias PON, sendo capaz de suportar diferentes serviços e padronizar a implementação de uma rede óptica capaz de oferecer taxas de transmissão compatíveis com as demandas residenciais e corporativas da época. Com isso, os padrões definidos pelo conjunto de recomendações ITU-T G.984.x se popularizou entre fabricantes de equipamentos, de uma forma que vários provedores de todas as partes do mundo começaram a utilizar essa tecnologia para levar a internet a seus clientes, inclusive nos mercados asiático e norte-americano, que atingiu níveis expressivos.

Porém, com a crescente evolução das tecnologias e a necessidade de altas taxas de transmissão ainda maiores que as suportadas pelo GPON, a ITU-T iniciou um conjunto de recomendações (série ITU-T G.987.x) chamado XGPON (*10G Passive Optical Networks*) na qual tinha como objetivo regularizar normas para a padronização do que viria a ser a próxima geração de redes capazes de alcançar maiores velocidades de download e upload.

O surgimento das tecnologias XGPON trouxe uma grande vantagem para as operadoras que hoje utilizam a tecnologia GPON em suas redes de acesso, que é a possibilidade de se aproveitar a infraestrutura já existente para migrar os clientes para a tecnologia XGPON. Essa migração permite que os provedores de internet ofereçam a seus clientes a possibilidade de contratar planos de internet com maiores larguras de banda. Para permitir tal migração, a recomendação ITU-T G.987 propõe a coexistência de uma rede GPON com uma rede XGPON sem alterações significativas da planta óptica externa, mediante alocação de diferentes

comprimentos de onda de downstream e upstream para cada um dos sistemas e inclusão de um componente passivo, denominado pela ITU-T G.984.5 e G.987 de WDM1r (ITU-T, 2010).

No Brasil o fornecimento de internet via fibra óptica se espalhou com a tecnologia EPON, que devido ao baixo valor na sua implantação, permitiu que vários provedores de internet migrassem do atendimento via rádio para a fibra óptica (Cianet, 2019). Mas por conta de sua limitação, logo a tecnologia EPON deu lugar a GPON, que permitiu o mercado de provedores oferecer maiores taxa de download e upload nos seus planos de internet.

Estudos feitos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) constataram que no ano de 2021 a internet estava acessível a 90% dos domicílios brasileiros (IBGE, 2022), e devido a essa acessibilidade, existe um maior número de pessoas conectadas, e conseqüentemente uma maior necessidade de fornecimento de banda de internet por parte dos provedores. Essa alta na quantidade de usuários de internet vêm crescendo a medida que são criados novos aplicativos e serviços *online*.

Durante o auge da pandemia do coronavírus (2021) diversas pessoas do mundo inteiro ficaram confinadas em suas casas para evitar a transmissão do vírus. E durante esse período muitos brasileiros tiveram que trabalhar de suas casas, além de utilizar diversos outros serviços que consumiam banda, o que fez dobrar o consumo de internet no Brasil (Olhar Digital, 2021). Essa necessidade repentina do consumo de internet durante aquele período veio como um alerta para os provedores para a troca da tecnologia GPON por uma capaz de oferecer maior largura de banda. Como solução a tecnologia vem como uma boa alternativa para esse problema, visto que diversos outros países já estão utilizando essa tecnologia.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é propor um modelo de construção de redes de atendimento via fibra óptica que facilite a transição da tecnologia GPON para a XGPON. Logo esse modelo tem como base a utilização conjunta das duas tecnologias, levando em consideração todas as limitações de cada uma delas,

para que seja encontrado um ambiente favorável para seu funcionamento em cenários reais. Inicialmente será exposta uma estrutura de rede capaz de utilizar a tecnologia GPON de acordo com os seus parâmetros de funcionamento, e posteriormente será incorporada a tecnologia XGPON a essa arquitetura. Esse estudo é importante para que seja encontrado um ambiente de bom funcionamento em comum das duas tecnologias, além de permitir que haja um maior fornecimento de banda de internet sem a necessidade de maiores investimentos. Para alcançar o objetivo geral esse trabalho irá alcançar os seguintes pontos específicos:

- Um estudo mais aprofundado sobre as tecnologias GPON e XGPON, para que seja extraído todo potencial de cada tecnologia, obedecendo a todas as recomendações;
- Definição de equipamentos GPON e XGPON para que haja um sistema onde as duas tecnologias estarão em funcionamento;
- Propor um modelo de projeto referência para a aplicação reais na qual seja aproveitado grande parte do investimento inicial quando houver a mudança de tecnologia;
- Utilizar uma ferramenta de simulação de redes ópticas com o objetivo de se realizarem vários testes para que se encontre um cenário que demonstra a possibilidade de as duas tecnologias funcionarem em um mesmo meio de propagação. Com essa ferramenta será obtido a BER e o diagrama de olho, dois fatores importantes para serem observados.

Para a simulação serão utilizados dois softwares o Optisystem e o Qgis. O Qgis (anteriormente conhecido como Quantum GIS) é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) de código aberto e gratuito. Ele é usado para visualizar, analisar e editar dados geoespaciais, como mapas, imagens de satélite, dados GPS e muito mais (Qgis, 2023). Já o Optisystem é uma ferramenta computacional que possui uma vasta biblioteca de componentes ópticos que permitem seus usuários testarem e simularem diversos sistemas de telecomunicações (OPTIWAVE, 2022).

1.3 Estrutura da dissertação

A estrutura deste estudo será a seguinte:

O Capítulo 1 apresenta um breve estudo sobre a utilização de redes ópticas para a distribuição de acesso à internet e a outros serviços. Também neste capítulo são apresentados os objetivos, as contribuições deste trabalho, e a sua motivação.

No Capítulo 2 são apresentadas as tecnologias de redes ópticas e as suas topologias de acesso mais utilizadas, na qual é dado ênfase aos atributos da camada física das tecnologias GPON e a XGPON. As outras camadas não são detalhadas neste estudo, podendo serem analisadas em trabalhos futuros.

No Capítulo 3 será definido um modelo para a rede de acesso óptica que permitirá a coexistência do GPON e XGPON de acordo com os padrões estabelecidos pelas recomendações.

No Capítulo 4 serão analisados e verificados resultados da arquitetura proposta por meio do cálculo de enlaces, simulações no optisystem, além de comparação de resultados com trabalhos consolidados.

E no Capítulo 5 serão apresentadas a conclusão geral do trabalho além de algumas sugestões de possíveis trabalhos que utilizem a mesma idéia deste estudo em questão, focado em desenvolver modelos de rede capazes de abrigar uma ou mais de redes de fibra ópticas, matendo assim a idéia da coexistência das novas gerações de redes PON.

2 REDES ÓPTICAS PASSIVAS E SUAS TOPOLOGIAS

As redes ópticas passivas representam uma abordagem crucial no fornecimento de comunicação de alta velocidade. Esses sistemas, baseados em fibra óptica, desempenham um papel fundamental na distribuição de serviços de internet, voz e dados. Suas topologias variadas, como GPON e XGPON, são estruturas chave na evolução das telecomunicações, permitindo a coexistência de múltiplas tecnologias para atender à crescente demanda por largura de banda e conectividade confiável. Este capítulo explora essa paisagem tecnológica, destacando como essas redes estão moldando e impulsionando a infraestrutura de comunicação global.

2.1 Redes PON

As redes PON utilizam apenas componentes passivos ao longo do enlace, ou seja, componentes que não necessitam de energia externa para o seu funcionamento (KEISER, 2014). Isso faz com que se tenha economia de energia e espaço na instalação dos equipamentos. Ela conecta o provedor ao seu local de destino utilizando arquiteturas FTTx (Fiber to the x), na qual o x pode ser FTTH (Fiber to the home) ou FTTB (Fiber to the building).

As aplicações da rede PON são diversas, se tornando muito utilizadas nos últimos anos por provedores de internet, seja para atender empresas, hospitais, hotéis, e até mesmo residências, pois garante sua eficácia e redução significativa na infraestrutura física e de custo operacional.

Segundo Keiser (2014), os equipamentos ativos que compõem um sistema PON consistem em dispositivos com emissores ópticos que exigem a utilização de energia elétrica para que coloquem em funcionamento os enlaces ópticos. Esses enlaces são alocados, geralmente, nas estações mais próximas de grande concentração de usuários. Os equipamentos de uma rede PON são: OLT (*Optical Line Termination*) e ONU (*Optical Network Unit*), sendo a ONU também reconhecida como ONT (*Optical Network Terminal*), quando ela é capaz de atender o uso de internet pelo sinal de Wi-Fi sem a necessidade de outro equipamento.

A Figura 1 ilustra como é feito o atendimento dos clientes finais e os tipos de serviços que podem ser oferecidos utilizando os três comprimentos de onda distintos (1310 nm, 1490 nm e 1550 nm) para fornecimento de serviços de dados, voz e imagem no mesmo meio de transmissão.

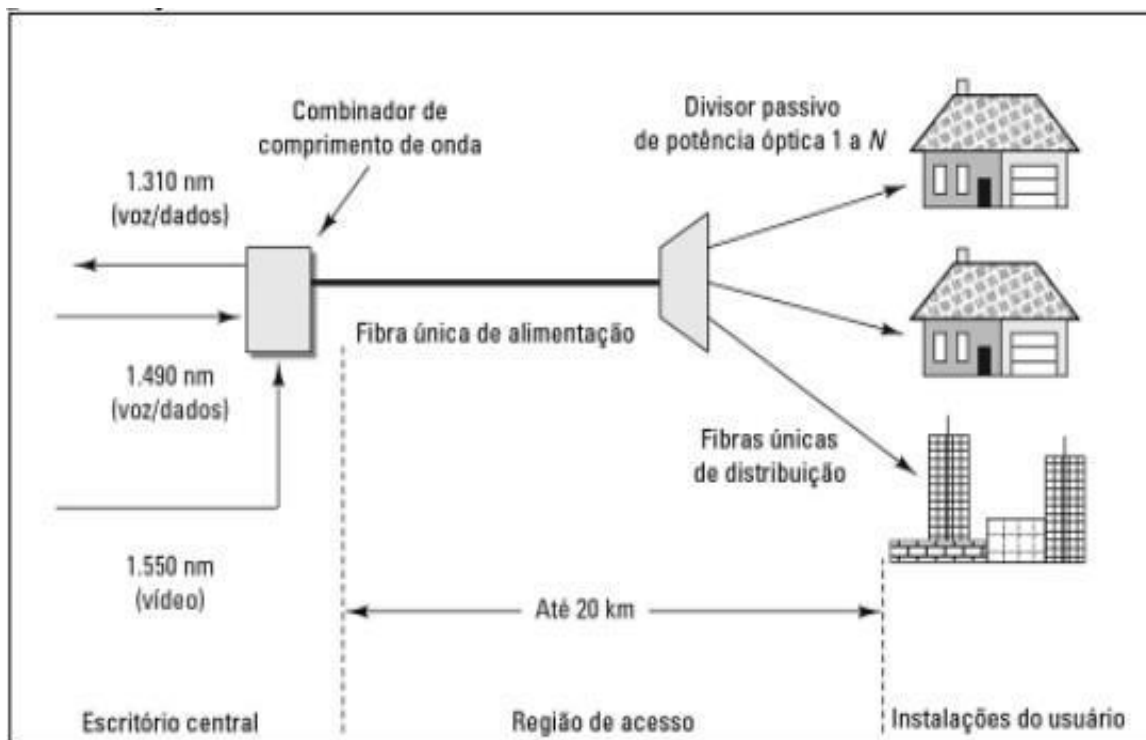


Figura 1 - Arquitetura PON.
Fonte: Keiser(2014).

2.2 Redes ópticas ponto a ponto e ponto-multiponto

A demanda pelos serviços de internet tem crescido bastante nos últimos anos. Segundo dados da Anatel, desde março de 2020 a janeiro de 2022, o número de acessos à banda larga fixa no Brasil cresceu 241% (de 16.6 milhões para 39.9 milhões), tendo atingido o seu pico em setembro de 2021, registrando 40.2 milhões de acessos (Anatel, 2022). Essa demanda por serviços de Internet tem feito as operadoras utilizarem diferentes tipologias de rede, com o objetivo de oferecerem uma estrutura que possa suprir as necessidades de seus clientes.

As topologias utilizadas no projeto destas redes são ponto a ponto e ponto multiponto. A Figura 2 apresenta a topologia ponto a ponto, na qual é utilizada uma fibra óptica para ligar um equipamento do site do provedor a um equipamento do cliente. Cada cliente tem uma conexão direta em fibra óptica, exclusiva com a central. No site existe um equipamento de acesso, que tipicamente pode ser um switch Ethernet com alta quantidade de portas, que se comunica com o outro switch que está no ponto do cliente. Nesta tipologia cada cliente utilizará uma porta do switch instalado na central, não havendo compartilhamento de portas do switch para mais de um cliente.

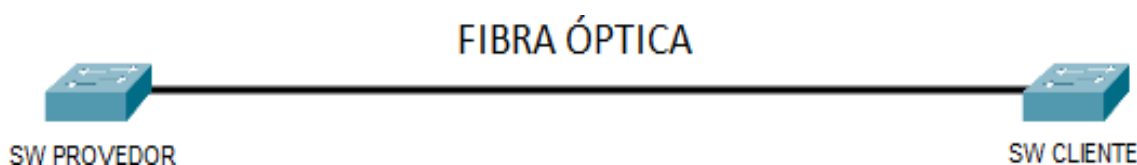


Figura 2 - Topologia ponto a ponto.
Fonte: Autor.

A desvantagem da tecnologia ponto a ponto é a utilização de um alto número de portas dos equipamentos de acesso, o que eleva os custos, tornando esta topologia apropriada apenas para situações em que se deseja atender clientes que pretendem contratar maior banda de internet. Nestes casos, uma porta do switch será disponibilizada para o cliente, justificando o uso de uma fibra no equipamento de acesso.

Para situações em que se deseja atender clientes com uma banda de internet menor, é indicado a tipologia de rede ponto-multiponto, uma vez que seus custos de implantação são menores, já que uma porta do equipamento poderá atender um número maior de clientes, principalmente com a chegada de tecnologias de redes PON de nova geração, que em suas recomendações podem chegar até 128 clientes por porta PON (GPON) dependendo da tecnologia utilizada.

Em uma rede ponto-multiponto, o sinal proveniente de uma porta do equipamento de acesso é dividido para um determinado número de clientes por meio do uso de componentes chamados de splitters. O sinal ao entrar no splitter é dividido dependendo de sua configuração, e a quantidade de clientes

provenientes de uma única porta PON é definida de acordo com a quantidade de splitters utilizados na rede e da sua configuração. Existem splitters ópticos e elétricos, e para as redes PON são utilizados os splitters ópticos, pois esse equipamento é passivo, que não necessita de alimentação elétrica para o seu funcionamento. A utilização desses componentes é feita de acordo com as necessidades da rede, mas devem ser utilizados seguindo as recomendações de cada tecnologia, uma vez que ao se adicionar um componente óptico há uma atenuação, que é a perda de potência de sinal óptico, o que limita a sua utilização. A Figura 3 apresenta um exemplo de uma rede ponto-multiponto.

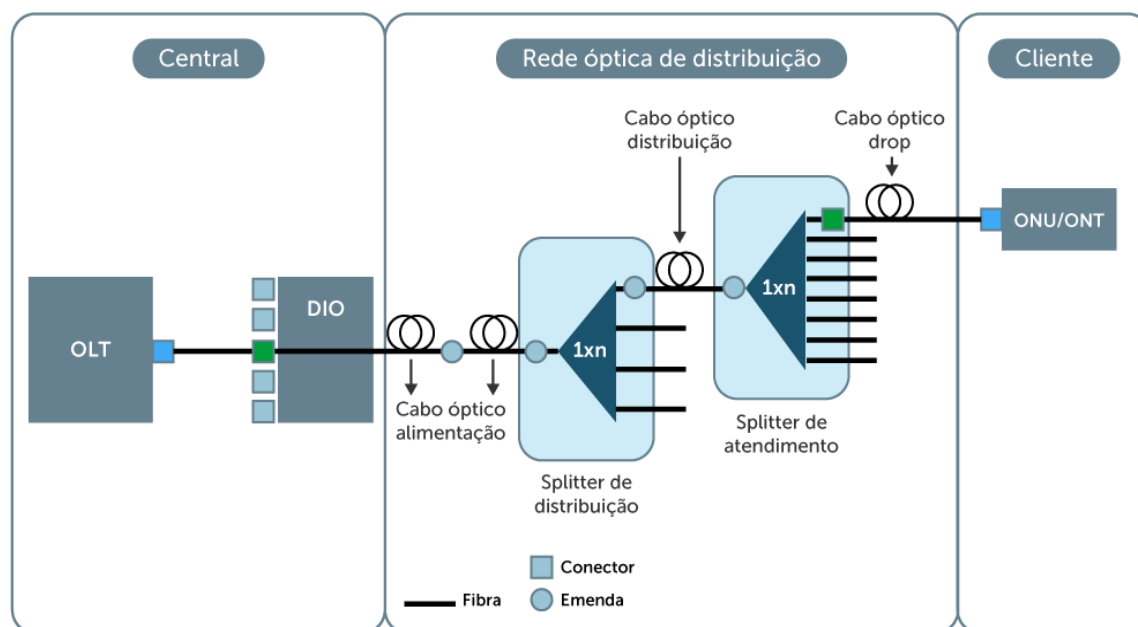


Figura 3 - Topologia ponto-multiponto.
Fonte: Intelbras.

As redes PON operam utilizando essas topologias e utilizam protocolos específicos que são capazes de controlar o acesso de múltiplos usuários atendidos por uma mesma rede. A comunicação é realizada em duplo sentido, no qual a OLT é instalada na Central e a ONU é instalada no cliente, possuindo a comunicação em dois sentidos: *Downstream* e *Upstream*.

No *downstream* (tráfego da OLT para a ONU) todas as ONUs recebem o tráfego. Os quadros que chegam até a ONU são filtrados através de um identificador (ID) contido em cada quadro. O tráfego que não pertence àquela ONU é descartado pelo equipamento. No *upstream* (tráfego da ONU para a OLT) as transmissões

ocorrem em modo TDMA (*Time Division Multiple Access*), a OLT controla o canal de retorno e separa os diferentes intervalos de tempo para cada ONU, que vai ocupar todo o canal de retorno para transmitir seu tráfego apenas no intervalo de tempo alocado a ela pela OLT. A figura 4 ilustra o downstream e upstream.

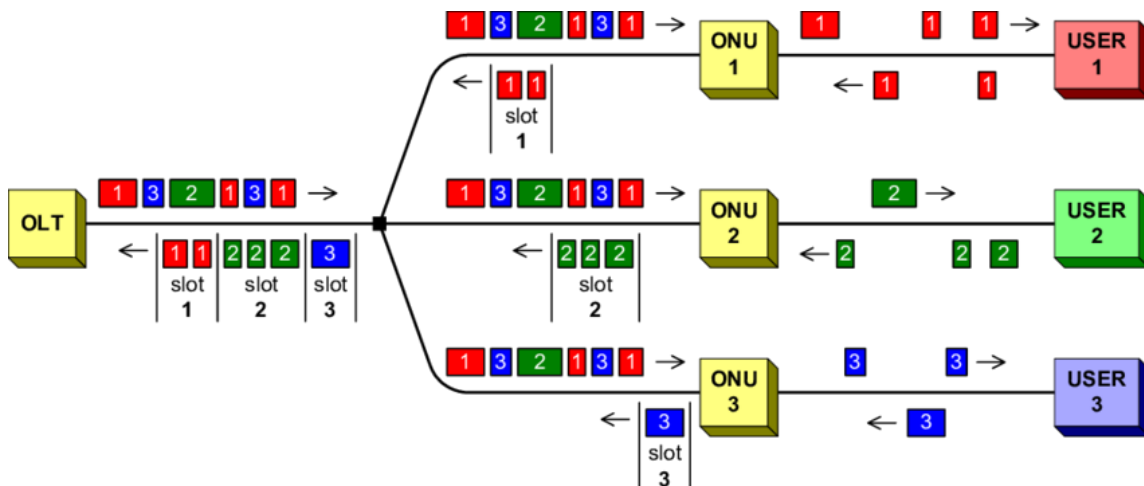


Figura 4 – Downstream e Upstream.

Fonte: IFSC.

As tecnologias de redes ópticas ponto-multiponto mais utilizadas no mercado atualmente são a GPON (Gigabit PON, padronizada pelo ITU-T G.984) e a EPON (Ethernet PON, padronizada pelo IEEE 802.3ah). A GPON tem se destacado no mercado brasileiro, por prover uma banda maior no downstream, fazendo com que as operadoras consigam oferecer planos com largura de banda maiores para os seus clientes (FTTH Handbook, 2012). Devido a isso, neste trabalho será utilizada a tecnologia GPON.

A ITU é uma agência especializada das Nações Unidas (ONU) que tem como um de seus objetivos desenvolver padrões técnicos que garantem a interconexão de redes e tecnologias. Para o GPON foram desenvolvidas algumas recomendações, que entre elas estão:

- ITU-T G.984.1: Características gerais da rede GPON;
- ITU-T G.984.2: Especificação da camada física do GPON;
- ITU-T G.984.3: Especificação da camada de transmissão de dados do GPON;

- ITU-T G.984.4: Especificação da interface de controle e gerenciamento das ONTs (OMCI: *ONT Management and Control Interface*);
- ITU-T G.984.5: Comprimentos de onda reservados para serviços adicionais, como NGPON;
- ITU-T G.984.6: Alcance estendido.

Dentre as recomendações informadas as que serão abordadas neste trabalho serão a ITU-T G.984.1 e a ITU-T G.984.2, que tem como foco as especificações necessárias para se existir a coexistência entre as redes GPON e XGPON. As outras recomendações poderão serem utilizadas em trabalhos futuros conforme estudos mais profundos acerca de tecnologias de fibra óptica.

2.3 Arquitetura GPON

A rede Gigabit PON (GPON) possui capacidade de tráfego assimétrica, na qual a taxa de downstream de 2,5 Gb/s é maior que a de upstream 1,25 Gb/s. Isso é muito bom para provedores, uma vez que a grande maioria dos seus usuários utilizam os serviços de download (netflix, youtube, facebook e etc), logo esse tipo de rede vem se tornando cada vez mais utilizada (Fibrastore, 2020). A figura 5 apresenta o funcionamento da tecnologia GPON, na qual trabalha com o comprimento de onda de 1490nm para o sentido downstream, e 1310nm para o sentido upstream.

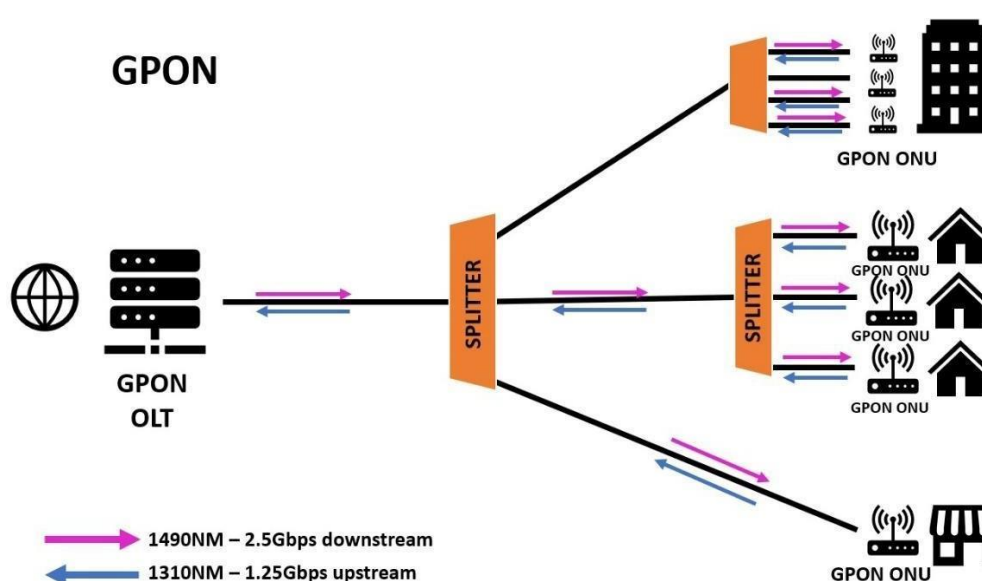


Figura 5 – Arquitetura GPON.

Fonte: Fibrastore.

Normalmente sua largura de banda é utilizada por até 128 usuários, dependendo do tipo de equipamento utilizado. Mas é indicado apenas 32 terminais de rede (ONTs) por cada porta do terminal de linha óptica (OLT). Isso devido à transmissão de vídeo por RF (Rádio Frequência) Overlay (Keiser, 2014).

Comparado com outras tecnologias PON, o GPON possui um maior nível de eficiência (em torno de 93%), pois possui o conceito de encapsulamento (payload) mais flexível, uma manutenção do suporte TDM original, o que o torna ideal para uso na infraestrutura óptica, serviços voltados para o mercado residencial e para acesso corporativo e uma solução de segurança de rede padrão incorporada (Cruz, 2014).

Os equipamentos que compõe a estrutura e são detalhados pelas recomendações G.984-1 e G.984-2, são:

- OLT: *Optical Line Terminal* – Esse equipamento é instalado nas instalações do provedor de internet e desempenha múltiplas funções, incluindo a transmissão e conversão de dados ópticos.
- ONU: *Optical Network Unit* – A ONU é o equipamento localizado no ponto de recepção do cliente, responsável por receber o sinal óptico proveniente da OLT e convertê-lo em um sinal elétrico, pronto para ser utilizado pelo usuário. Essa unidade geralmente é instalada no local onde o cliente deseja receber os serviços de internet.
- ODN: *Optical Distribution Network* – A ODN (Rede de Distribuição Óptica) é composta por cabos ópticos e componentes passivos, tais como os splitters ópticos, que realizam a divisão e distribuição do sinal óptico para múltiplos clientes, permitindo a conexão simultânea de diversos usuários à rede óptica. Essa rede é essencial para a expansão e disseminação dos serviços de internet através da fibra óptica.

Esses equipamentos são de essencial importância para a arquitetura da rede. Outros equipamentos podem ser utilizados ou não, dependendo da necessidade da rede. Um que será a chave para a coexistência das redes GPON e XGPON é o Filtro WDM (*Wavelength-division Multiplex*).

O filtro WDM é um componente óptico passivo essencial para a coexistência das tecnologias XGPON e GPON em uma mesma infraestrutura óptica. Ele possibilita a inserção simultânea de múltiplos comprimentos de onda na rede óptica, permitindo que diferentes tecnologias de acesso compartilhem a mesma estrutura de fibra óptica. O funcionamento do filtro WDM baseia-se na propriedade de divisão de comprimentos de onda da luz. Com esse componente, é possível transmitir sinais de diferentes tecnologias em comprimentos de onda distintos, evitando interferências entre elas e garantindo que a rede seja capaz de suportar o tráfego de dados proveniente de ambas as tecnologias XGPON e GPON de forma harmoniosa.

2.4 Arquitetura XGPON

O XGPON representa a próxima geração de redes PON, projetada para oferecer velocidades de transmissão de até 10 gigabits por segundo, atendendo às demandas cada vez mais exigentes de banda larga e proporcionando uma experiência de usuário aprimorada.

Com o XGPON, provedores de serviços podem oferecer planos de internet mais rápidos e capacidades robustas para suportar os serviços e aplicativos mais avançados do futuro. Toda a arquitetura XGPON e seus elementos são definidos na recomendação ITU-T G.987.1. A Figura 6 apresenta um modelo de atendimento utilizando a tecnologia XGPON, mostrando os comprimentos de onda utilizados, sendo o do downstream 1577, e 1277 para o upstream.

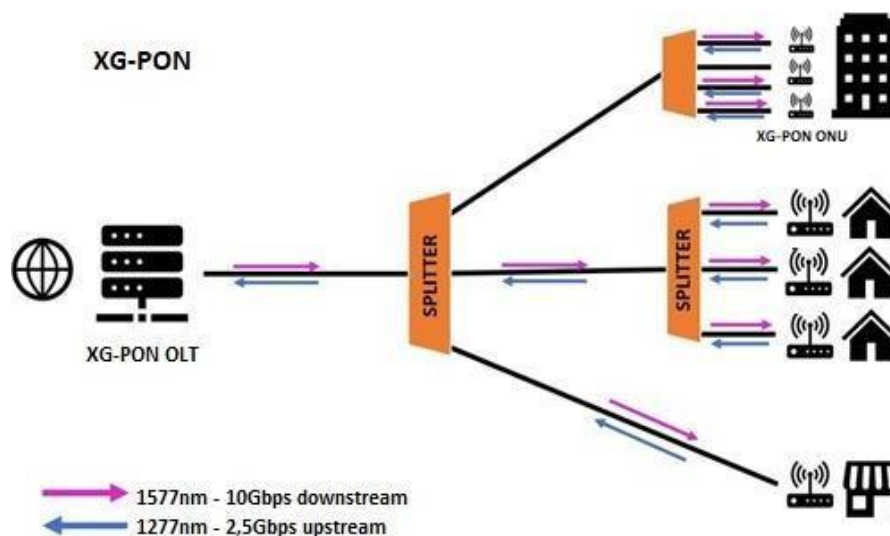


Figura 6 – Arquitetura XGPON.
Fonte: Fibrastore.

Como o GPON, a estrutura de uma rede XGPON é composta pela OLT, ODN e pela ONU, sendo também possível a adição de componentes ópticos como splitters e amplificadores dependendo de sua necessidade.

A recomendação G.987.1 representa um avanço significativo em relação à G.984.1, pois introduz dois novos cenários de aplicação para o XGPON que não eram contemplados anteriormente. Essas novas possibilidades ampliam ainda mais a versatilidade e a capacidade de atendimento do XGPON em diferentes ambientes e necessidades específicas de conectividade. Os dois novos cenários são:

- *FTTO (Fiber-To-The-Office)*: Nesse cenário, o XGPON é utilizado para oferecer conectividade de fibra óptica diretamente para escritórios e pequenas empresas. A ONU (Optical Network Unit) no local do cliente é a responsável por receber o sinal óptico da OLT (Optical Line Terminal) e convertê-lo em um sinal elétrico para atender às necessidades de conectividade da empresa. Essa abordagem permite uma conectividade de alta velocidade e desempenho confiável, essencial para o funcionamento eficiente de negócios em ambientes corporativos.
- *FTTCell (Fiber-To-The-Cell)*: Nesse cenário, a ONU é utilizada como backhaul para estações móveis de várias gerações, incluindo 2G, 3G, 4G e a mais recente tecnologia 5G. A ONU atua como uma interface de conexão entre as estações móveis e a infraestrutura de rede principal, proporcionando uma conexão confiável e de alta capacidade para as redes de comunicação móvel. Essa aplicação é fundamental para garantir uma infraestrutura robusta e escalável para o funcionamento eficiente das redes móveis de próxima geração.

Esses novos cenários de aplicação expandem significativamente o escopo de utilização do XG-PON, tornando-o ainda mais adequado para atender às demandas de conectividade de diversos setores e ambientes. A recomendação G.987.1 representa um importante avanço na padronização e implementação do XG-PON, contribuindo para o desenvolvimento contínuo das redes de acesso óptico de próxima geração. Devido a sua maior largura de banda no sentido downstream e upstream, a

tecnologia XGPON se tornou utilizável em situações em que a GPON anteriormente não era recomendada.

2.5 Coexistência harmoniosa entre GPON e XGPON: Rumo à conectividade de próxima geração

A tecnologia GPON veio como substituto do EPON, oferecendo uma maior largura de banda e capacidade de atender um maior número de clientes por porta PON. Quando começou a transição de tecnologia no mercado as empresas tiveram um grande desafio de migrarem seus clientes uma vez que a coexistência da tecnologia GPON com a EPON não era permitida. Com a evolução das redes ópticas novas tecnologias vêm aparecendo no mercado. As chamadas de NG- PONs (Next-Generation PONs) trazem a proposta de oferecer maior largura de banda para seus clientes e a possibilidade da coexistência da tecnologia GPON e NG-PONs em uma mesma estrutura. Com o a maior largura de banda será possível que os provedores de internet ofereçam a seus clientes maiores planos de internet, já que nos últimos anos vários serviços que utilizam internet foram criados, e a tecnologia GPON não conseguirá atender a todos esses serviços devido a sua banda de 2.5Gbps por porta PON.

A possibilidade da coexistência das tecnologias em uma mesma estrutura de cabos, splitters e outros componentes ópticos permitem uma grande economia em infraestrutura para provedores de internet, pois estima-se que 76% do investimento total de uma rede óptica FTTH em locais sem rede existente seja da planta óptica (Huawei, 2010). Outro ponto muito importante é que com a possibilidade da coexistência, não haverá necessidade de transferir todos os clientes de uma só vez para o XGPON, uma vez que a GPON ainda está em funcionamento, preservando assim todo o investimento inicial com ONU. Estimasse que o valor das ONU, correspondem a 21% do investimento total da rede (Huawei, 2010). Só haverá necessidade de migrar clientes que possuam uma maior demanda de internet.

Para otimizar o aproveitamento da planta óptica e permitir a coexistência harmoniosa entre as tecnologias GPON e XGPON, torna-se imprescindível a implementação de um componente passivo, conforme definido pelo ITU, chamado WDM1r (ITU-T, 2010). Trata-se de um filtro WDM (*Wavelength-division Multiplex*) passivo que é estrategicamente adicionado após a OLT na central. O filtro WDM1r

desempenha um papel fundamental no sentido do downstream, permitindo a inclusão dos comprimentos de onda do GPON e XGPON na mesma do GPON. Essa integração dos comprimentos de onda garante a transmissão eficiente dos sinais ópticos das duas tecnologias através da mesma infraestrutura de rede, o que resulta em uma coexistência harmônica e eficaz. Já no sentido upstream, o filtro WDM1r realiza uma separação cuidadosa dos comprimentos de onda de retorno do GPON e XGPON (ITU-T, 2010), direcionando-os adequadamente para suas respectivas OLTs. Esse processo de separação é crucial para garantir que os dados provenientes dos clientes de ambas as tecnologias sejam roteados corretamente e atendidos pelas OLTs correspondentes.

A Figura 7 ilustra de forma esquemática o funcionamento do filtro WDM1r, evidenciando sua importância no processo de coexistência entre GPON e XGPON. Esse componente passivo se torna a base sólida para o sucesso da transição tecnológica e a oferta de serviços avançados de conectividade para os usuários finais. Com a implementação eficiente do filtro WDM1r, os provedores de internet têm a capacidade de utilizar de forma ótima a infraestrutura óptica já existente, proporcionando aos clientes planos de internet mais abrangentes e com velocidades impressionantes. Essa abordagem é essencial para acompanhar o crescente ritmo das demandas por banda larga e possibilitar a oferta de serviços de próxima geração de forma fluida e confiável.

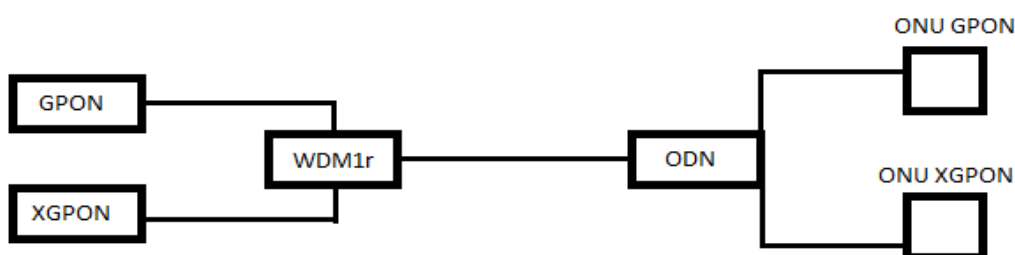


Figura 7 - Funcionamento de um filtro WDM1r.
Fonte:Autor.

2.6 Largura de banda das redes PON

A capacidade de largura de banda de uma rede PON varia de acordo com a tecnologia utilizada. No caso da tecnologia GPON, as taxas de transmissão

recomendadas pela ITU G.984.1 são assimétricas, com 2.5Gbps para downstream (da central para o usuário) e 1.25Gbps para upstream (do usuário para a central).

Por sua vez, o XGPON, como uma evolução da tecnologia GPON, possui taxas de transmissão assimétricas definidas como 10Gbps para downstream e 2.5Gbps para upstream. Essa maior capacidade de transmissão no sentido do downstream permite um aumento significativo na velocidade de download, atendendo às crescentes demandas por serviços de streaming, jogos online e aplicações de alta qualidade. Outra tecnologia importante é o XGSPON, que difere do XGPON ao oferecer taxas de transmissão simétricas, ou seja, 10Gbps tanto para downstream quanto para upstream (Venko, 2021). Essa simetria na velocidade de transmissão é especialmente relevante para casos em que a demanda por upload é tão importante quanto a de download, como em ambientes corporativos, onde são realizados frequentes envios de arquivos grandes e interações em tempo real.

2.7 Alcance de funcionamento das redes PON

O alcance máximo de uma rede PON é um elemento fundamental para garantir o correto funcionamento do sistema. Ele representa a distância máxima permitida entre uma ONT (Optical Network Terminal) e uma OLT (Optical Line Terminal) para que a rede continue operando de maneira eficiente e confiável. A recomendação G.984.1, emitida pela ITU, estabelece três parâmetros essenciais a serem levados em consideração: o alcance lógico, o alcance físico e o alcance diferencial [11]. Esses parâmetros são específicos para cada tecnologia PON, como o GPON e o XGPON, e são indicados pelas recomendações G.984.2 e G.987.2, respectivamente (ITU-T, 2010);

- **Alcance físico:** Refere-se à distância máxima que pode ser alcançada entre a OLT e a ONU. Para ambas as tecnologias (GPON e XGPON), o alcance físico é limitado a 20 km. Esse parâmetro considera as características de atenuação da fibra óptica, bem como eventuais perdas nos componentes ópticos, como os splitters, ao longo do trajeto da rede.

- Alcance lógico: Representa a distância máxima entre a OLT e a ONU, sem levar em conta as limitações da camada física. Para ambas as tecnologias PON, o alcance lógico estabelecido é de 60 km. Esse parâmetro permite uma maior flexibilidade na configuração das redes, permitindo alcançar distâncias mais extensas sem comprometer o desempenho.
- Alcance diferencial: Refere-se à distância máxima que permite o atraso na propagação do sinal recebido pela OLT, vindo das ONUs. Em 2010, a recomendação G.984.7 do ITU-T ampliou o alcance diferencial de 20 km para 40 km. Essa expansão proporciona maior margem de atraso, possibilitando o uso de redes mais complexas e com distâncias maiores.

Esses parâmetros são fundamentais para o planejamento e dimensionamento adequado das redes PON. O conhecimento preciso do alcance físico, lógico e diferencial permite que os provedores de serviços projetem suas infraestruturas com eficiência, garantindo que as demandas dos clientes sejam atendidas em toda a área de cobertura. O contínuo aprimoramento desses parâmetros evidencia o compromisso do setor em expandir e otimizar as redes PON, oferecendo soluções cada vez mais robustas e abrangentes para o fornecimento de serviços de internet de alta qualidade em todo o mundo.

2.8 Definição da Taxa de Splitagem em Redes PON

Os splitters são essenciais para a utilização de redes PON em atendimento a uma grande quantidade de clientes, uma vez que eles permitem dividir o sinal óptico. Os splitters ópticos são elementos passivos que podem ser adicionados em vários pontos da rede óptica, seja no site junto à OLT ou cascadeados, podendo serem posicionados mais próximo dos clientes. Esse equipamento se divide em duas categorias, balanceado e desbalanceado. Os splitters balanceados são aqueles que dividem igualmente o sinal óptico em suas saídas, e o desbalanceado são aqueles que dividem suas saídas em diferentes porcentagens determinadas pelo fabricante. Para a construção da rede óptica proposta neste projeto, serão utilizados splitters balanceados, pois eles permitem atender igualmente todos os clientes em toda a distribuição da rede.

Embora sejam componentes essenciais, é importante ressaltar que os splitters balanceados causam uma significativa atenuação do sinal óptico enquanto a luz passa por eles. A Tabela 1 apresenta as perdas em decibéis (dB) dos splitters balanceados, variando de acordo com o número de saídas, representado por N.

N	Perda por inserção (dB)
2	4
4	7,3
8	10,5
16	13,7

Tabela 1 – Perda dos splitters mais utilizados na rede de fibra óptica.

O projeto deve levar em consideração essas perdas para garantir que o sinal óptico chegue com qualidade adequada a todas as ONUs, mesmo após a divisão. Uma correta avaliação e dimensionamento dos splitters, juntamente com o uso de componentes ópticos de alta qualidade, contribuirá para minimizar as perdas e assegurar um funcionamento eficiente e confiável da rede óptica.

A recomendação G.984.2 padronizou inicialmente a taxa de split para o GPON, possibilitando o atendimento de até 64 clientes por porta PON na ODN (*Optical Distribution Network*). No entanto, com o avanço constante da tecnologia, novas possibilidades surgiram, permitindo a implementação de uma taxa de split maior, chegando a suportar até 128 clientes em uma única porta PON. Essa evolução proporcionou uma maior escalabilidade das redes e a capacidade de atender um número ainda maior de clientes de forma eficiente.

Já para a tecnologia XGPON, a recomendação indica inicialmente uma taxa de split mínima de 1:64, o que significa que um único PON pode atender até 64 clientes. No entanto, com o avanço contínuo da tecnologia, é possível alcançar taxas de split ainda maiores, chegando a 1:128 ou até mesmo 1:256. Essas taxas mais elevadas permitem que uma única porta PON atenda um número substancial de

clientes, ampliando ainda mais a capacidade de transmissão de dados e a oferta de serviços de internet de alta velocidade.

Logo, é importante levar em consideração que apesar das recomendações da ITU em um sistema de coexistência GPON e XGPON, cada tecnologia possui seu limite, e o mercado de provedores têm aprimorado os equipamentos utilizados na distribuição de internet via fibra óptica, permitindo alcançar maiores taxas de splitagem.

Dois fatores são considerados os mais importantes quando se deseja escolher a taxa de splitagem de uma rede. O primeiro é qual a largura de banda mínima e máxima que o provedor deseja ofertar, pois a taxa de splitagem influencia diretamente na largura de banda. O segundo fator seria o alcance máximo da rede, pois os splitters ocasionam atenuações, interferindo diretamente no sinal de luz transportado.

2.9 Meio de transmissão

A fibra óptica é estabelecida pela recomendação G.984.2 e G.987.2 como o principal meio físico de transmissão a ser utilizado em uma rede PON (Passive Optical Network). Suas características ópticas e construtivas devem seguir as especificações definidas pela ITU-T G.652 (ITU-T, 2011). A fibra óptica é amplamente escolhida devido às suas propriedades excepcionais que a tornam uma opção altamente eficiente para a transmissão de dados. Ela apresenta vantagens significativas em relação a outros meios de transmissão, como o cobre, pois é imune a interferências eletromagnéticas, proporcionando uma transmissão mais estável e confiável de sinais de luz. Além disso, a fibra óptica possui uma capacidade de largura de banda muito maior, permitindo a transmissão de grandes volumes de dados em velocidades extremamente altas.

Para a construção da rede óptica aérea, é comum utilizar cabos autossustentados, que garantem a resistência e a durabilidade necessárias para enfrentar condições adversas ao longo do trajeto, desde a saída no site do provedor até as caixas de terminação óptica (CTOs). Esses cabos autossustentados são especialmente projetados para suportar esforços mecânicos, como tensão e cargas de vento, sem a necessidade de suportes adicionais.

Na etapa de transporte do sinal óptico da caixa CTO até a residência do cliente, são empregados cabos drop. Esses cabos são projetados com apenas uma fibra óptica em sua construção, facilitando a conexão direta entre a ONU e a caixa CTO, simplificando a instalação e minimizando as perdas de sinal.

A escolha da fibra óptica como meio de transmissão nas redes PON garante um bom desempenho, possibilitando a oferta de serviços de internet de alta qualidade, com velocidades rápidas e confiáveis, atendendo às demandas crescentes dos usuários e permitindo a expansão dos serviços em larga escala. A utilização de cabos autossustentados e cabos drop também contribui para a eficiência da rede, assegurando uma infraestrutura confiável para a transmissão óptica em longas distâncias, bem como para a conexão direta e simplificada aos clientes finais.

2.10 Comprimentos de onda

As redes ópticas operam em duas direções cruciais para o funcionamento eficiente dos serviços de internet: o sentido de downstream e o sentido de upstream. No sentido de downstream, o sinal é transmitido da OLT (*Optical Line Terminal*) para a ONU (*Optical Network Unit*), permitindo o fornecimento de dados, mídia e outros conteúdos para os clientes conectados à rede. Já no sentido de upstream, o sinal é enviado da ONU para a OLT, possibilitando a comunicação do cliente com o provedor de serviços, permitindo, por exemplo, o envio de dados e solicitações para a internet. A recomendação G.984.2 estabelece que a transmissão em ambas as direções, através do meio físico (fibra óptica), é necessária para o correto funcionamento da rede PON (*Passive Optical Network*). Esse sistema bidirecional é fundamental para atender às demandas crescentes de serviços de internet e garantir uma comunicação eficaz entre os clientes e os provedores de serviços.

Uma prática comum na estrutura das redes PON é a utilização de apenas uma fibra óptica para atender vários clientes, o que torna o investimento na montagem da infraestrutura mais econômico. As OLTs e ONUs utilizadas no mercado atualmente são equipadas com um filtro WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) interno, que é responsável por separar os sinais de downstream e upstream. Esse filtro WDM permite que as diferentes frequências ou comprimentos de onda sejam transmitidos em paralelo através da mesma fibra óptica, possibilitando a transmissão simultânea

de dados em ambas as direções. Na Figura 8 (Tecwi, 2019), são apresentados os comprimentos de onda específicos utilizados para o sentido de upstream e downstream nas tecnologias GPON e XGPON. Esses comprimentos de onda são cuidadosamente selecionados para garantir uma comunicação eficiente e confiável entre a OLT e as ONUs, permitindo a coexistência harmoniosa das tecnologias e o correto funcionamento da rede óptica PON.

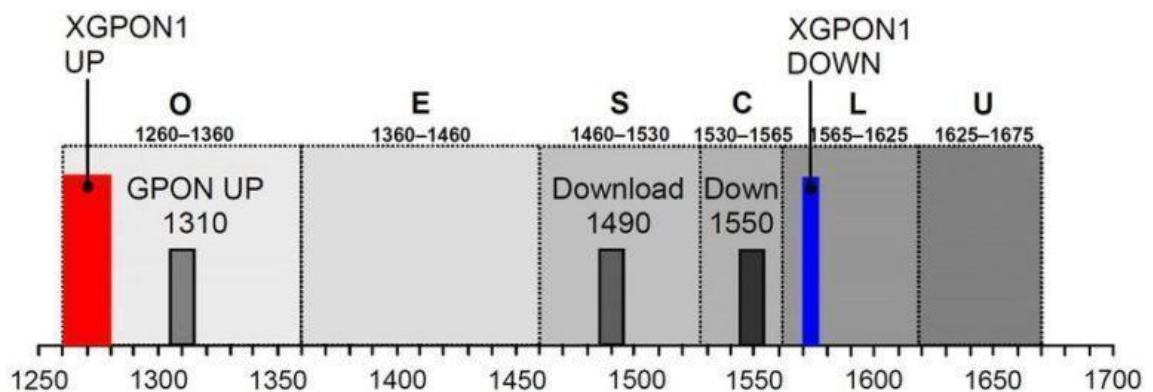


Figura 8 - Comprimentos de onda GPON e XGPON.
Fonte: tecwi.

2.11 Transmissores ópticos

Os transmissores ópticos são dispositivos responsáveis por converter os sinais elétricos em sinais de luz que irão trafegar na rede óptica. Para a tecnologia GPON a ITU-T por meio da recomendação G.984.2, são definidos cinco diferentes classes de ODNs que são a Classe A, Classe B, Classe C, Classe B+ e Classe C+. Cada uma dessas classes possuem diferentes valores para a transmissão e recepção.

As OLTs e ONUs que estão disponíveis no mercado utilizam transmissores do tipo DFB (*Distributed Feedback Laser*). Esses transmissores possuem características específicas que garantem um desempenho adequado na transmissão óptica. Duas das principais especificações são a taxa de supressão dos modos laterais e a largura espectral.

A taxa de supressão dos modos laterais é uma medida da capacidade do transmissor de minimizar os modos laterais, que são frequências indesejadas que podem causar interferência no sinal óptico. Na tecnologia GPON, a taxa de supressão dos modos laterais mínima dos transmissores DFB é de 30dB, o que significa que eles

devem ser capazes de reduzir os modos laterais em pelo menos 30dB para garantir um sinal óptico limpo e sem interferências. Já a largura espectral representa a largura máxima do espectro de frequência da luz emitida pelo transmissor, medida a 20dB abaixo da máxima amplitude da frequência central. Na tecnologia GPON, a largura espectral dos transmissores DFB é de 1nm, o que indica a abrangência das frequências de luz utilizadas na transmissão óptica.

A potência média dos transmissores da OLT e da ONU são definidas por meio de classes. Essas classes tem como objetivo definir a potência do transmissor. Essa potência é padronizada em uma faixa de valores para que haja uma otimização nos custos de produção dos equipamentos (OLTs e ONUs) pelos fabricantes. As Tabelas 1 e 2 apresentam a potência máxima e mínima para cada classe de transmissores das OLTs e ONUs na tecnologia GPON.

Classe OLT (GPON)	Potência Média dBm (Min)	Potência Média dBm (Max)
Classe A	0	4
Classe B	5	9
Classe C	3	7
Classe B+	1,5	5
Classe C+	3	7

Tabela 2: Potência mínima e máxima de transmissão da OLT GPON.

Fonte: Cardoso, 2015.

Classe ONU (GPON)	Potência Média dBm (Min)	Potência Média dBm (Max)
Classe A	-3	2
Classe B	-2	3
Classe C	2	7
Classe B+	0,5	5
Classe C+	0,5	5

Tabela 3: Potência mínima e máxima de transmissão da ONU GPON.

Fonte: Cardoso, 2015.

Segundo Cardoso, 2015 pag. 17, para a tecnologia XG-PON a ITU-T por meio da recomendação G.987.2 define duas classes de transmissores para a OLT e ONU: a nominal e a *extended*. A classe Nominal utiliza componentes ópticos que estão mais disponíveis no mercado, enquanto a classe *extended* ainda necessita de maior estudo e desenvolvimento por parte da indústria, para se tornar viável sua utilização no mercado (ITU-T, 2011). Devido à maior disponibilidade de componentes ópticos no mercado, e sua possível utilização real por parte deste projeto, esse trabalho irá propor em sua arquitetura a utilização da classe nominal. A classe Nominal é dividida em duas subclasses, a N1 e a N2. A classe N1 utiliza um receptor óptico do tipo APD (*Avalanche Photodiode*). A classe N2 é dividida em mais duas subclasses, a N2a e a N2b. Elas se diferenciam pelo seu receptor óptico, pois enquanto a classe N2a utiliza o receptor do tipo APD, a classe N2b utiliza um receptor do tipo PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*).

Para a codificação dos pulsos tanto no sentido de downstream e no sentido de upstream é utilizada codificação NRZ (*Non Return to Zero*), em que o valor binário zero é definido quando há baixa emissão de luz por parte do transmissor, e o valor um é definido pela alta emissão de luz.

Como preconiza Cardoso, pag. 18, a taxa de extinção é definida como a diferença em dB entre os valores médios da potência que definem os bits “1” e “0”. No sistema GPON, ao operar com velocidades de 1,25Gbps para upstream e 2,5Gbps para downstream, é necessário que a taxa de extinção do transmissor da ONU seja igual ou superior a 10dB, enquanto o da OLT deve ser igual ou superior a 8,2dB. Para sistemas utilizando a tecnologia XGPON, a taxa de extinção precisa ser igual ou superior a 8,2dB tanto no sentido de downstream quanto no sentido de upstream.

2.12 Receptores ópticos

Os receptores ópticos, também conhecidos como fotodetectores, desempenham um papel fundamental nas redes PON. Esses dispositivos têm a função de converter os sinais ópticos provenientes da fibra óptica em sinais elétricos, tornando possível a recepção e interpretação dos dados transmitidos. Existem diferentes tipos de receptores, cada um com suas peculiaridades, e neste trabalho iremos utilizar para o sistema GPON os fotodetectores do tipo APD tanto na OLT

quanto nas ONUs. O APD é a escolha mais adequada para sistemas que operam com taxas de recepção iguais ou superiores a 1,25Gbps. Esses fotodetectores possuem características específicas que permitem uma alta sensibilidade na recepção dos sinais ópticos, garantindo uma transmissão de dados confiável e de alta velocidade. Já no sistema XGPON, são empregados fotodetectores do tipo PIN na recepção dos equipamentos que fazem parte dessa tecnologia, especialmente nas ONTs da classe N2b, que são as utilizadas neste projeto. O fotodetector PIN é especialmente indicado para aplicações em que se requer uma boa sensibilidade na detecção de sinais ópticos, permitindo a recepção precisa de dados em alta velocidade. A escolha dos fotodetectores apropriados para cada sistema é essencial para garantir o desempenho e a eficiência da rede óptica, pois com o uso de fotodetectores adequados, é possível assegurar uma transmissão estável e de alta qualidade, permitindo que os usuários finais desfrutem de uma experiência de internet rápida e confiável, independentemente da tecnologia utilizada.

Quando realizamos o cálculo do enlace em uma rede óptica, é de extrema importância considerar duas variáveis fundamentais: a potência óptica de saturação e a sensibilidade dos receptores. Esses parâmetros têm papel crucial na garantia de uma transmissão eficiente e confiável de dados na rede. A potência óptica de saturação do receptor é definida como a máxima potência óptica média que o receptor pode receber e ainda manter uma Taxa de Erro de Bits (*BER*) menor ou igual a 10^{-10} (ITU-T, 2011), ou seja, é o nível máximo de potência que pode ser alcançado pelo sinal óptico sem comprometer a qualidade da transmissão. Por outro lado, a sensibilidade do receptor representa o menor valor médio de potência óptica que, ao ser recebido pelo dispositivo, mantém a BER abaixo ou igual a 10^{-10} . Esse valor indica a capacidade do receptor em detectar sinais ópticos fracos de forma confiável.

É importante ressaltar que o cálculo do enlace deve levar em conta o efeito conhecido como "*power penalty*" ou penalidade de potência. Esse efeito se refere à redução aparente da sensibilidade do receptor causada por diversas distorções no meio de transmissão, tais como reflexões, dispersão cromática, interferência simbólica, entre outros. Essas perturbações podem afetar a qualidade do sinal recebido pelo receptor e, conseqüentemente, comprometer o desempenho da rede. Por isso, é necessário assegurar que a *power penalty* não ultrapasse o limite de 1 dB,

para garantir uma transmissão confiável (ITU-T, 2010). Ao considerar cuidadosamente a potência óptica de saturação, a sensibilidade dos receptores e a power penalty, podemos projetar uma rede óptica que seja capaz de transmitir dados de forma eficiente, com alta qualidade e baixas taxas de erro. Essas medidas garantem que os dados trafeguem com segurança e confiabilidade, atendendo às necessidades dos usuários finais e proporcionando uma experiência de internet rápida e estável.

Seguindo o mesmo sentido dos transmissores, existem 5 classes de receptores para a tecnologia GPON, que se diferenciam pelos valores da saturação, sensibilidade e power penalty. A tabela abaixo apresenta os valores de sensibilidade, saturação e power penalty para cada classe tanto na OLT como na ONU.

Classe OLT	Sensibilidade Mínima (dB)	Saturação Mínima (dB)	PowerPenalty (dB)
Classe A	-24,0	-3,00	1,00
Classe B	-28,00	-7,00	1,00
Classe C	-29,00	-8,00	1,00
Classe B+	-28,00	-8,00	0,50
Classe C+	-32,00	12,00	1,00

Tabela 4: Sensibilidade, saturação e power penalty OLT GPON.
Fonte: Cardoso, 2015.

Classe ONU	Sensibilida de Mínima (dB)	Saturação Mínima (dB)	Power Penalty (dB)
Classe A	-21,00	-1,00	1,00
Classe B	-21,00	-1,00	1,00
Classe C	-28,40	-8,00	1,00
Classe B+	-27,00	-8,00	0,50
Classe C+	-30,00	-8,00	5,00

Tabela 5: Sensibilidade, saturação e power penalty ONU GPON.
Fonte: Cardoso, 2015.

Da mesma maneira que o GPON, são especificados os valores mínimos de sensibilidade e de saturação para os receptores da OLT e ONU do XGPON. A BER deve se manter menor ou igual a 10^{-4} para o upstream e 10^{-3} para o downstream. Diferentemente do GPON, a tecnologia XGPON utiliza o uso de FEC (*Forward Error Correction*) que é um método de obter o controle de erros de bits, esse método é obrigatório no downstream e no upstream. A sensibilidade e a saturação possuem o mesmo sentido que na tecnologia GPON, e a *power penalty* deve ser no máximo de 1 dB em todas as classes de ONU e OLT.

Seguindo o mesmo caso dos transmissores, os receptores da tecnologia XGPON possuem classes, e neste caso são divididos em dois tipos a Nominal e Extended. A classe nominal é dividida em duas subclasses chamadas de N1 e N2, e que por sua vez a classe N2 é subdividida em N2a e N2b no sentido downstream. A figura 9 (Cardoso, 2015) ilustra os valores da sensibilidade e da saturação na classe nominal.

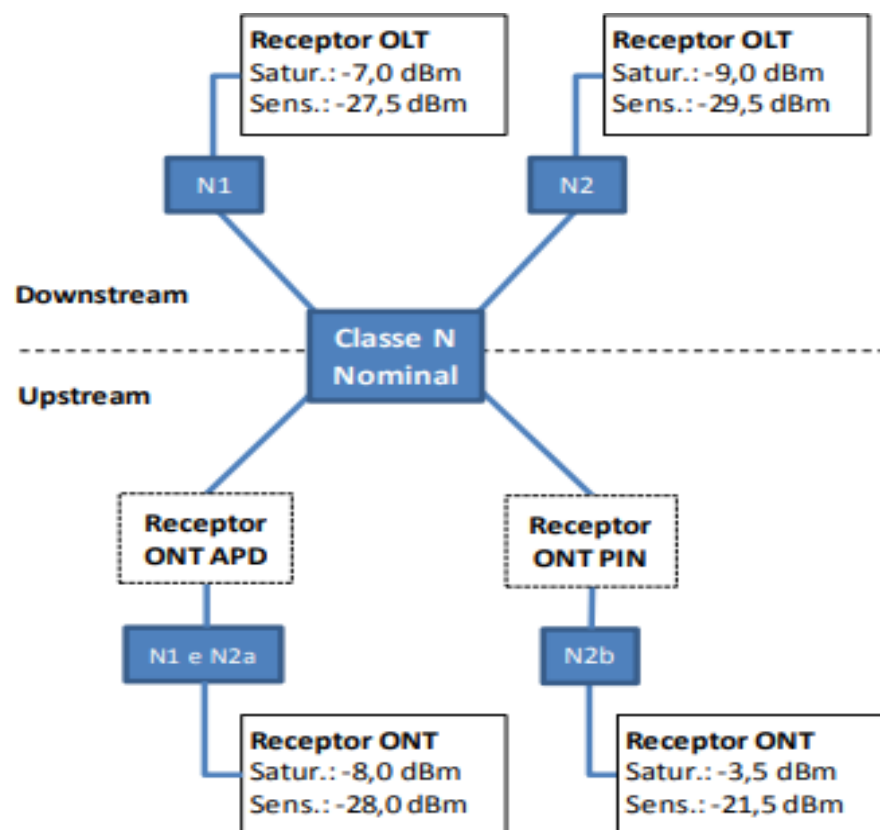


Figura 9: Receptores XGPON [10]
Fonte: Cardoso, 2015

2.13 Enlace óptico

A atenuação é um fator fundamental para garantir o bom funcionamento das tecnologias GPON e XGPON, pois afeta diretamente a capacidade de transmissão e recepção de informações na rede óptica. Os valores máximos de atenuação são limites estabelecidos para garantir que os sinais ópticos não sofram perdas excessivas ao longo do percurso. Quando a atenuação excede os valores máximos permitidos, o sinal pode se tornar muito fraco, resultando em perda de dados e baixa qualidade de transmissão. Por outro lado, uma atenuação muito baixa pode causar saturação nos receptores ópticos, levando a distorções e problemas de comunicação.

Para garantir o cumprimento dos requisitos de atenuação, é essencial que os cabos de fibra óptica e outros componentes da rede sejam escolhidos com precisão. Além disso, é necessário um projeto cuidadoso da infraestrutura óptica, levando em conta as características dos equipamentos e as distâncias de transmissão envolvidas.

As tabelas 6 e 7 (Cardoso, 2015) apresentam os valores máximos e mínimos de atenuação respectivamente para a tecnologia GPON e XGPON. Estes valores devem ser respeitados tanto no sentido downstream como no sentido upstream para que se possa garantir que os receptores ópticos pertencentes a ONU e a OLT respeitem os limites de saturação e que possa garantir a BER necessária para não se haver perda de informação na recepção.

Classe ONU GPON	Atenuação Mínima (dB)	Atenuação Máxima (dB)
Classe A	5,00	20,00
Classe B	10,00	25,00
Classe C	15,00	30,00
Classe B+	13,00	28,00
Classe C+	15,00	32,00

Tabela 6 – Classes ONU GPON
Fonte: Cardoso, 2015

Classe ONU XGPON	Atenuação Mínima (dB)	Atenuação Máxima (dB)
Classe N1	14,00	16,00
Classe N2	29,00	31,00

Tabela 7 – Classes ONU XGPON
Fonte: Cardoso, 2015

Podemos utilizar as equações abaixo para se chegar na atenuação máxima e mínima permitida em um enlace óptico. É o valor máximo permitido de perda de sinal em um determinado meio de transmissão ou componente do sistema de comunicação, em outras palavras, representa a maior redução de intensidade do sinal que é aceitável antes que o sinal se torne muito fraco para ser corretamente detectado ou interpretado pelo receptor. Já atenuação mínima segue o mesmo princípio da atenuação máxima, só que nesse caso seria o menor valor de atenuação possível na qual respeitem os limites para identificação dos sinais nos receptores, permitindo que os mesmo consigam reconhecer os sinais e identificar qual informação está sendo passada.

$$\text{Atenuação mínima [dB]} = \text{Potência máxima TX [dBm]} - \text{Saturação RX [dBm]} \quad (1.0)$$

$$\text{Atenuação máxima [dB]} = \text{Potência mínima TX} - \text{Sensibilidade RX} - \text{Power Penalty} \quad (1.1)$$

Um parâmetro bastante importante é o chamado *differential optical path loss* (perda diferencial de caminho óptico). Esse parâmetro estabelece um limite para a atenuação máxima entre o sinal recebido de duas ONUs em uma mesma rede óptica. Em outras palavras, esse parâmetro assegura que a diferença de atenuação entre o sinal óptico recebido por duas ONUs, mesmo que estejam em locais distintos na rede, não ultrapasse 15 dB. Manter a perda diferencial de caminho óptico dentro desse limite é crucial para garantir a qualidade do serviço e a estabilidade da rede, minimizando a possibilidade de interrupções ou perdas de dados. O cumprimento desse parâmetro é uma das principais diretrizes para o projeto e a implantação de redes ópticas PON confiáveis e eficientes, permitindo que os provedores de serviços ofereçam uma experiência de internet de alta qualidade para os usuários finais.

A dispersão cromática e a PMD (Dispersão dos Modos de Polarização) são parâmetros fundamentais a serem considerados em sistemas de transmissão óptica, pois podem afetar significativamente o desempenho e a qualidade do sinal. Esses dois parâmetros estão diretamente relacionados à atenuação e à degradação do sinal óptico durante sua propagação ao longo das fibras ópticas.

A dispersão cromática ocorre devido ao fato de que diferentes comprimentos de onda do sinal óptico viajam em velocidades ligeiramente distintas dentro da fibra óptica. Essa diferença nas velocidades de propagação leva a uma dispersão temporal, o que pode resultar em uma distorção do sinal e dificuldade em recuperar os dados originais corretamente no receptor.

A PMD, por sua vez, é causada pela birefringência natural da fibra óptica, que resulta em diferentes velocidades de propagação para os modos de polarização ortogonal. A PMD pode causar atrasos diferentes para os modos de polarização, resultando em um alargamento do pulso óptico e potencialmente reduzindo a largura de banda do sistema.

No sistema GPON, embora não haja um valor especificado para dispersão cromática e PMD, esses parâmetros ainda são levados em consideração durante o projeto da rede. Os fabricantes de equipamentos ópticos e provedores de serviços devem garantir que a dispersão cromática e a PMD permaneçam em níveis aceitáveis para alcançar o desempenho desejado na transmissão de dados. Por outro lado, no sistema XGPON, é definido um valor máximo de alcance de 20 km para garantir que os valores de dispersão cromática e PMD sejam mantidos dentro de limites aceitáveis. Essa limitação do alcance é importante para evitar a degradação significativa do sinal ao longo das fibras ópticas mais extensas, onde a dispersão cromática e a PMD podem se tornar maiores.

3 Proposta de modelo de projeto e metodologia para a sua validação

O capítulo aborda a complexidade da criação de uma arquitetura de referência para redes ópticas de acesso, destacando desafios na coexistência de tecnologias GPON e XGPON numa mesma infraestrutura. O objetivo é preservar investimentos em infraestrutura óptica existente, enquanto atende às crescentes demandas por largura de banda. A taxa de split e o alcance máximo são aspectos cruciais a serem considerados para garantir o desempenho ideal e a interoperabilidade das tecnologias. O modelo proposto visa integrar GPON e XGPON em uma única rede óptica, permitindo a migração dos clientes sem investimentos massivos. Essa abordagem oferece uma solução inovadora para os desafios dos provedores de internet, promovendo a evolução contínua das redes de acesso ópticas e o acesso a serviços avançados para os usuários finais.

3.1 Rede de acesso óptica proposta

A criação de uma arquitetura de referência para redes ópticas de acesso enfrenta desafios significativos, especialmente quando se trata da coexistência das tecnologias GPON e XGPON no mesmo meio de propagação, ou seja, na mesma rede de fibra óptica. Essa abordagem tem como objetivo principal preservar os investimentos realizados por pequenos e médios provedores de internet em suas infraestruturas ópticas existentes, ao mesmo tempo em que busca oferecer maior largura de banda para atender às crescentes demandas dos clientes em relação ao consumo de dados. Ao viabilizar a coexistência, os provedores de internet podem continuar a utilizar suas redes GPON existentes e, ao mesmo tempo, incorporar as vantagens e maiores capacidades oferecidas pelo XGPON. Isso resulta em uma economia significativa de custos, evitando a necessidade de substituir toda a infraestrutura de uma só vez, o que poderia ser um desafio financeiro para muitas empresas.

A construção de um modelo sólido para redes ópticas de acesso, capaz de suportar tanto as tecnologias GPON como XGPON, requer a consideração de todos os atributos essenciais da camada física e dos equipamentos envolvidos. Esses atributos estabelecem as premissas fundamentais que devem ser cuidadosamente

analisadas no projeto da infraestrutura óptica, a fim de garantir o pleno funcionamento e o desempenho ideal dessas tecnologias. No entanto, para tornar viável a coexistência harmoniosa das tecnologias GPON e XGPON, há a necessidade de observar outros parâmetros fundamentais para garantir o correto funcionamento e a interoperabilidade dessas tecnologias dentro do mesmo meio de propagação óptica.

A taxa de split é um desses parâmetros, visto que é ela quem define a quantidade de clientes que podem ser atendidos por uma única ONU. Tanto na GPON quanto na XGPON, a taxa de split é um fator crítico que influencia diretamente a capacidade da rede de fornecer serviço de alta qualidade e largura de banda adequada para todos os clientes conectados. É essencial ajustar a taxa de split de acordo com as demandas da rede e o perfil dos usuários, visando otimizar o desempenho geral da infraestrutura.

Outro ponto a se considerar seria qual o alcance máximo de atendimento que o modelo de rede suportará, uma vez que cada tecnologia possui as suas especificidades, e se falando em alcance devemos levar em consideração a atenuação e a classe de equipamentos utilizada.

A análise e teste minuciosos de todas essas variáveis são essenciais para desenvolver um modelo de arquitetura de referência capaz de respeitar todas as normas e recomendações abordadas neste projeto. Além disso, ao aplicar esse modelo no mercado de provedores de internet, é crucial verificar a disponibilidade de materiais e equipamentos no mercado, garantindo a viabilidade e praticidade da implementação. Neste capítulo, apresentaremos uma arquitetura de rede óptica que reunirá diversos conceitos discutidos ao longo deste estudo, permitindo o suporte eficiente tanto para a tecnologia GPON quanto para a XGPON. Muitos desses conceitos já foram estudados e aprofundados em pesquisas anteriores (Batagelj, 2012), mas o objetivo principal deste trabalho é propor um modelo que auxilie os provedores de internet a integrarem essas duas tecnologias em uma única rede óptica de acesso, cumprindo todas as diretrizes estabelecidas pela ITU. Essa abordagem de rede óptica será de grande valor ao permitir a migração dos clientes para a nova tecnologia sem a necessidade de investimentos massivos em infraestrutura. Dessa forma, as empresas poderão enfrentar o desafio crescente de fornecer maiores quantidades de banda de internet, já que novas tecnologias emergentes estão demandando serviços com capacidades cada vez maiores.

Assim, a proposta deste modelo de rede óptica oferece uma solução inovadora e pragmática para os desafios enfrentados pelos provedores de internet na atualidade. Ao unir a expertise em tecnologia óptica com uma abordagem cuidadosamente planejada e em conformidade com as normas internacionais, espera-se que esse modelo se torne uma ferramenta valiosa para o progresso do mercado de internet, viabilizando a evolução contínua das redes de acesso ópticas e garantindo o acesso a serviços cada vez mais avançados e de alta performance para os usuários finais.

A arquitetura da rede óptica deve ser cuidadosamente planejada, levando em conta aspectos operacionais essenciais para garantir o sucesso do projeto. Neste trabalho, destacamos os seguintes pilares:

- **Tecnologia GPON:** A implantação da tecnologia GPON é uma base sólida para a arquitetura, garantindo a conformidade com todas as especificações dessa tecnologia. Isso permitirá alcançar o máximo desempenho dentro da rede e proporcionar serviços de alta qualidade aos usuários.
- **Opção de Mudança para XGPON:** A rede óptica deve ser projetada para permitir a coexistência das tecnologias GPON e XGPON em um mesmo meio de propagação. Dessa forma, os usuários receberão ambos os sinais em suas residências, e a tecnologia a ser utilizada será escolhida de acordo com a necessidade do uso de banda, proporcionando maior flexibilidade ao sistema.
- **Estrutura com bons materiais e equipamentos:** A robustez da infraestrutura é fundamental para a estabilidade e confiabilidade da rede óptica. Será dada atenção especial à escolha de cabos de fibra óptica e equipamentos de alta qualidade, capazes de suportar as degradações ambientais e garantir a integridade dos sinais ópticos.
- **Conformidade com Órgãos Regulatórios:** Todos os materiais utilizados na rede serão escolhidos de acordo com as normas e regulamentações estabelecidas pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) e outros órgãos reguladores. Isso garante que a rede esteja em conformidade com as exigências legais e seja devidamente licenciada para operar.

- Disponibilidade: A capacidade da rede de atender a uma quantidade adequada de clientes em uma determinada região é essencial para garantir uma competição justa entre os provedores de internet. A rede será dimensionada para oferecer serviços de qualidade e atender à demanda crescente de usuários, permitindo uma expansão futura quando necessário.

Todas essas características devem ser respeitadas, uma vez que esse projeto tem como um de seus objetivos a implantação de sua arquitetura de rede em situações reais. Cada ponto citado deve ser seguido de forma a garantir que os provedores que se adequarem a esse tipo de projeto, além de poderem oferecer a seus clientes maior largura de banda, possam entregar uma internet de qualidade e confiável.

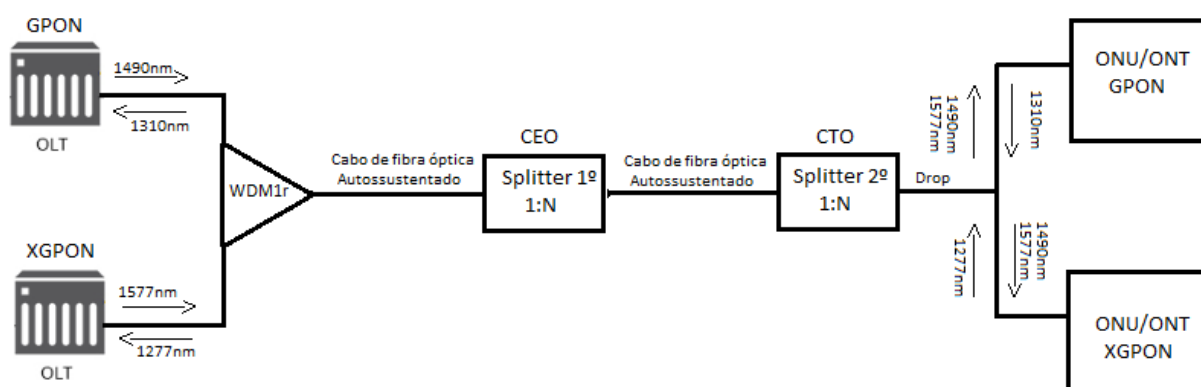


Figura 10 - Arquitetura proposta da rede óptica.
Fonte: Autor.

Conforme mostrada na figura 10, a arquitetura proposta está de acordo com as recomendações já apresentadas neste trabalho das tecnologias GPON e XGPON, respeitando todos os critérios. Os comprimentos de onda utilizados na rede para downstream e upstream do GPON e XGPON são diferentes, isso é um dos pontos cruciais que permitem a coexistência, uma vez que não haverá conflito de sinal.

As fibras ópticas utilizadas também estão de acordo com as recomendações do ITU para redes de acesso PON. O cabo drop considerado na G.657 é muito utilizado para atender clientes residenciais, uma vez que seu custo não é tão elevado quanto o cabo autossustentado, e como ele é mais maleável facilita que a instalação dos clientes seja FTTH (*Fiber to the home*), pois consegue se sair bem

dentro de ambientes mais caóticos, permitindo que não haja micro curvaturas em sua instalação (Garvery, 2012).

O *overlay* de rede é um aspecto crucial ilustrado na figura 10, que se tornou possível graças à utilização do filtro WDM1r. Esse componente é responsável por realizar a multiplexação dos comprimentos de onda, permitindo o compartilhamento da mesma infraestrutura de rede óptica entre as tecnologias GPON e XGPON. No sentido downstream, o filtro WDM1r permite a inclusão dos comprimentos de onda de ambas as tecnologias na infraestrutura óptica compartilhada. No sentido upstream, ele separa os comprimentos de onda de retorno, direcionando-os corretamente para suas respectivas OLTs. Além disso, o *overlay* de rede possibilita uma transição mais suave entre as tecnologias, permitindo que os provedores migrem gradualmente para o XGPON conforme a demanda por maior largura de banda cresce. Isso evita a necessidade de grandes investimentos iniciais e proporciona uma expansão mais flexível e escalável da rede no futuro.

3.2.1 Rede de atendimento

O processo de distribuição de banda larga de internet para atender os clientes é, de fato, bastante complexo e requer um investimento considerável por parte dos provedores de internet. A construção de uma rede de fibra óptica exige a utilização de diversos equipamentos que viabilizam a distribuição eficiente da internet, desde a central até as residências dos usuários, especialmente no modelo de FTTH (*Fiber-to-the-Home*). Entre os principais equipamentos utilizados nesse processo estão:

- Conectores: São dispositivos utilizados para conectar cabos de fibra óptica entre si ou com equipamentos ópticos, permitindo a transmissão eficiente de sinais ópticos de um ponto a outro na rede de comunicação. Esses conectores desempenham um papel crucial na instalação e na manutenção de redes de fibra óptica, proporcionando uma conexão óptica precisa e confiável. Eles são projetados para alinhar e acoplar as extremidades das fibras ópticas de forma que a luz possa ser transmitida com o mínimo de perda de sinal.
- Caixas de Atendimento (CTO): É um componente utilizado em redes de telecomunicações para abrigar e proteger as conexões de fibras ópticas que

são utilizadas na distribuição de serviços de internet, televisão, telefone e outros serviços de comunicação. Essa caixa é especialmente importante em redes de acesso, onde as fibras ópticas são distribuídas para os clientes finais.

- Cabos Drop: São cabos ópticos com apenas uma fibra, utilizados para fazer a conexão entre a caixa de atendimento e a ONT (*Optical Network Terminal*) instalada no interior do domicílio do cliente.
- Caixas de Emenda (CEO): A caixa de emenda proporciona um ambiente seguro para que as fibras ópticas sejam unidas, protegidas e mantidas em condições adequadas para garantir a integridade e o funcionamento eficiente da rede. Ela é usada em situações como a expansão da rede, reparos em cabos danificados, alterações na topologia da rede ou emendas de novos cabos.
- Distribuidor Óptico (DIO): Ele é usado para gerenciar e distribuir conexões de fibras ópticas em sistemas de telecomunicações. O distribuidor óptico permite rotear os sinais ópticos de forma eficiente e organizada, garantindo a conectividade entre diferentes pontos da rede.

Recentemente, uma solução inovadora chamada de caixa de atendimento conectorizada, também conhecida como NAP (*Network Access Point*), foi desenvolvida pelos provedores de internet. Essa solução trouxe vantagens significativas, uma vez que possibilitou a instalação dos clientes sem a necessidade de um técnico especialista em fusão de fibras ópticas. Anteriormente, a fusão de fibras ópticas demandava habilidades técnicas específicas e consumia considerável tempo e recursos, o que por vezes retardava o atendimento aos clientes. A utilização do NAP permitiu que os provedores economizassem tempo e recursos, uma vez que não seria mais necessário realizar a fusão de fibras ópticas na caixa de atendimento. Isso proporcionou uma instalação mais rápida e simplificada, tornando o processo de atendimento aos clientes mais eficiente.

Essa abordagem inovadora facilitou o acesso à internet de alta velocidade para os usuários finais, tornando o serviço mais acessível e contribuindo para a expansão das redes de fibra óptica em diferentes regiões. Dessa forma, a utilização de caixas de atendimento conectorizadas tem sido uma solução bem-sucedida para os provedores de internet, tornando o acesso à banda larga mais prático e viável para

um maior número de usuários. A figura 11 apresenta um exemplo de uma CTO conectorizada.



Figura 11 - Caixa de terminação óptica conectorizada.
Fonte: Furukawa.

Além da economia proporcionada pela utilização de conectores, outro ponto muito importante é acerca dos cabos utilizados para a instalação. Já mencionado neste trabalho, o cabo drop veio como uma solução para facilitar a instalação dos clientes, e por conta da facilidade em sua utilização, funcionou muito bem com os conectores, facilitando mais ainda as instalações (Nishioka, 2005). A desvantagem na utilização do drop é sua estrutura que apesar de maleável não possui uma grande resistência, o que facilita o rompimento da fibra.

Pensar na melhor maneira de atender seus clientes é um dos principais objetivos para as empresas que trabalham oferecendo o serviço de internet, pois a estrutura em que a rede é montada é um dos fatores mais importantes, pois é ela que irá definir os procedimentos necessários para a instalação, influenciando diretamente na qualidade em que o serviço é oferecido. As perdas provenientes da utilização de conectores e cabos drop devem ser consideradas no cálculo do enlace, e a indústria de telecomunicações tem trabalhado fortemente em produzir conectores de qualidade

em que as perdas por parte de sinal possam ser mínimas, possibilitando a rede de alcançar maiores distâncias (Furukawa, 2020).

3.2.2 Componentes de divisão de sinal óptico: Splitters ópticos

Os splitters ópticos são componentes passivos utilizados nas redes PON, especialmente entre a OLT (*Optical Line Terminal*) e as ONU (*Optical Network Unit*). Sua função é dividir o sinal óptico em várias fibras ópticas de saída, permitindo que um único sinal seja compartilhado entre múltiplas ONU, atendendo a diversos clientes em uma rede de fibra óptica. A sua estrutura é constituída de uma ou duas entradas e N fibras de saída, permitindo dividir um ou mais sinais em vários outros dependendo do número de saídas. A relação entre o número de saídas e as fibras de saída é o que define a taxa de split do splitter. Por exemplo, um splitter com taxa de split de 1:32 possui uma entrada e 32 saídas, permitindo que um sinal seja distribuído para até 32 ONU. A Figura 12 apresenta um exemplo de splitter óptico.

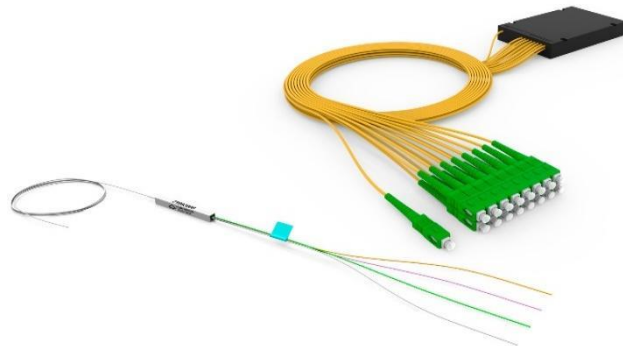


Figura 12 - Splitter óptico.
Fonte: Furukawa.

Normalmente as tecnologias mais abundantes no Brasil atualmente (GPON e EPON) utiliza utilizados splitters de configurações 1:8 e 1:16 em redes de atendimento, que dependendo de sua configuração e da tecnologia de rede PON utilizada, podem dividir um sinal de saída de uma PON da OLT para atender até 128 clientes (GPON). Por conta da necessidade deste dispositivo, várias empresas produzem e vendem, facilitando assim o seu acesso. Para esse projeto será respeitado todas as normas ITU sobre a utilização deste dispositivo para construção

da arquitetura proposta. Inicialmente o sinal proveniente das OLTs utilizadas nesse projeto irá passar por um splitter de 1:8, o que irá ser considerado o primeiro estágio de derivação. Normalmente nesse primeiro estágio, o splitter óptico fica acomodado em caixas de emenda, permitindo que a sua saída, nesse caso as oito fibras sejam fusionadas em um ou mais cabos contendo fibras que levará os sinais ópticos para o último nível de derivação. Neste estágio será utilizado um splitter de capacidade de 1:16. Este splitter ficará acoplado dentro da caixa de atendimento, permitindo assim a capacidade de atender até dezesseis clientes por CTO

A capacidade de dividir o sinal em múltiplas saídas torna os splitters ópticos uma peça-chave na arquitetura das redes PON, possibilitando a criação de redes ópticas de acesso eficientes, capazes de fornecer serviços de internet de alta velocidade e qualidade para um grande número de clientes. Com a evolução tecnológica, os splitters ópticos continuam desempenhando um papel importante no fornecimento de conectividade e acesso à banda larga, tornando-se um componente essencial para o desenvolvimento e a expansão das redes de fibra óptica em todo o mundo.

3.2.3 Meio de transmissão: Fibra óptica

Fibra óptica é um tipo de cabo de transmissão utilizado em sistemas de comunicação para enviar dados sob a forma de luz pulsante. É composta por filamentos extremamente finos de vidro ou plástico transparente, chamados de fibras ópticas, que são capazes de transmitir sinais de luz ao longo de grandes distâncias com alta velocidade e baixa perda de sinal.

O princípio de funcionamento da fibra óptica baseia-se na reflexão interna total da luz ao longo do núcleo da fibra. A luz que é injetada na extremidade da fibra é refletida ao longo do núcleo, mesmo quando há curvas no caminho, permitindo que os sinais ópticos sejam transmitidos sem perdas significativas de intensidade. As fibras ópticas são utilizadas em uma variedade de aplicações, incluindo:

- **Redes de Telecomunicações:** São amplamente utilizadas em redes de telecomunicações para transmitir voz, dados e vídeo. Elas são essenciais em

redes de longa distância, redes metropolitanas e redes de acesso de alta velocidade, como as redes de fibra até a casa (FTTH).

- Internet de Alta Velocidade: As fibras ópticas são fundamentais para fornecer conexões de internet de alta velocidade, pois são capazes de transmitir grandes volumes de dados em velocidades extremamente altas.
- Aplicações Industriais e Médicas: Fibras ópticas também são empregadas em aplicações industriais, como em endoscópios utilizados em procedimentos médicos, em sistemas de iluminação, em medições de temperatura e em diversas outras áreas onde a transmissão de luz é necessária.

As fibras ópticas são classificadas em dois principais tipos: monomodo e multimodo, cada uma com características específicas que determinam sua aplicação em diferentes contextos de construção de redes.

- Fibra Óptica Monomodo (Single-mode): Refere-se a uma fibra óptica com um núcleo muito pequeno, geralmente em torno de 9 a 10 micrômetros de diâmetro. Este tipo de fibra permite que apenas um modo de luz se propague através dela, resultando em menos dispersão e atenuação do sinal. A fibra monomodo é usada em longas distâncias, como em redes de longa distância (WAN), troncos de comunicação de operadoras e em aplicações que exigem altas velocidades e largura de banda.
- Fibra Óptica Multimodo: A fibra multimodo possui um núcleo maior, geralmente entre 50 a 100 micrômetros de diâmetro, permitindo a propagação de múltiplos modos de luz. Embora seja mais suscetível à dispersão modal, a fibra multimodo é mais fácil e menos dispendiosa de ser instalada e é adequada para distâncias mais curtas. É comumente utilizada em redes locais (LAN), conexões de curta distância, como em edifícios corporativos, campus universitários e em sistemas de comunicação de data centers.

Quanto à construção de redes, ambos os tipos de fibra óptica (monomodo e multimodo) têm suas aplicações específicas e são escolhidos com base nos requisitos de alcance, largura de banda e custo da rede. Para longas distâncias e alta largura de

banda, como em redes de longa distância, a fibra monomodo é a preferida. Por outro lado, em distâncias mais curtas e instalações locais, a fibra multimodo é mais comum devido à sua facilidade de instalação e custo mais baixo. A escolha entre os dois tipos depende das necessidades específicas de cada rede e das considerações de custo e desempenho. Para a construção dessa arquitetura serão utilizadas fibras monomodo, visto que é necessário acompanhar os limites de distância das tecnologias PON, e como a monomodo possui uma menor atenuação por distância, ela acaba se tornando a mais indicada para construção de redes de atendimento utilizando fibra óptica.

A recomendação da ITU-T G.652 aborda as especificações de fibras monomodo, destacando suas características geométricas, mecânicas e de transmissão, especialmente para aquelas com dispersão nula em 1310 nm. Essas fibras são compostas principalmente por um núcleo de sílica dopada com germânio, que tem um diâmetro variando de 5 μm a 8 μm , envolto por uma camada de sílica com diâmetro de 125 μm . A perda nominal de sinal dessa fibra fica em torno de 0,4 dB/km em 1310 nm e 0,35 dB/km em 1550 nm.

Existem quatro subgrupos da recomendação G.652 (A, B, C e D). O tipo A e B possuem um pico de atenuação muito forte entre os comprimentos de onda 1330nm e 1410nm, afetando bastante os sinais de luz para tecnologias como GPON já que sua comunicação funciona próximo a essa faixa, tanto no sentido downstream como no sentido upstream, inviabilizando assim o uso desses tipos de fibra para essa tecnologia.

Já as fibras C e D são recomendadas para utilização do GPON e XGPON, pois não há um pico de atenuação em todas as faixas de comprimento de onda, o que faz o sinal de luz vir perdendo força de maneira uniforme, conforme vem percorrendo o caminho da fibra. Embora as fibras tipo C e D tenham características ópticas semelhantes, há uma diferença significativa no valor de PMD (Dispersão dos Modos de Polarização) entre elas. A fibra tipo D possui um coeficiente de PMD menor em comparação à fibra tipo C, tornando-a mais adequada para sistemas que exigem altas taxas de transmissão, como é o caso das tecnologias GPON e XGPON. Essa vantagem é especialmente importante em um contexto em que as tecnologias de comunicação estão em constante evolução, resultando em uma crescente demanda por maior capacidade de banda de internet. Ao optar pela fibra tipo D, a arquitetura proposta neste trabalho permitirá a utilização prolongada da infraestrutura, garantindo

assim maior durabilidade e eficiência da rede. Consequentemente, tanto na rede primária (backbone) quanto na rede secundária, a fibra do tipo D será amplamente utilizada para assegurar uma transmissão confiável e eficaz dos sinais ópticos. Isso contribuirá para uma arquitetura sólida e preparada para atender às crescentes demandas de banda de internet, conforme as tecnologias continuam a evoluir. A Figura 13 apresenta um gráfico com a atenuação da fibra do tipo G.652 (Tipo D), mostrando a curva de atenuação do sinal óptico de acordo com o comprimento de onda.

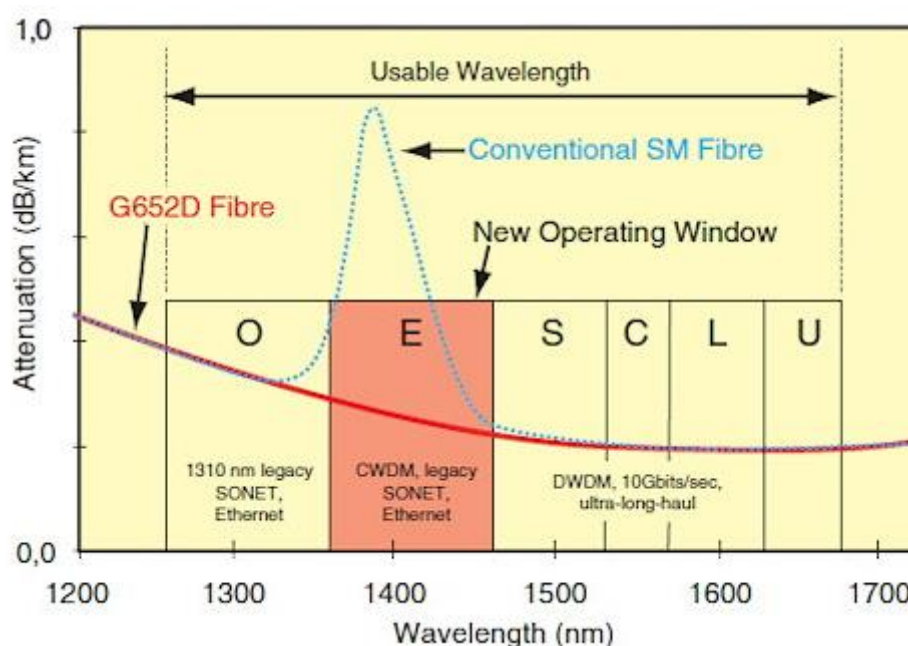


Figura 13 – Comportamento das fibras do tipo G652D dentre os comprimentos de onda.
Fonte: Ispblog

Para o atendimento interno aos clientes existe outra recomendação ITU-U que é a G.657 que também é dividida em quatro subgrupos (A, B, C e D). Ela recomenda o uso do cabo do tipo Drop para levar o sinal de luz proveniente das CTOs até a residência do cliente. As fibras da série G.657 são conhecidas por sua capacidade de suportar curvas apertadas e flexibilidade em ambientes de instalação restritos, como dutos e caixas de distribuição. Essas características tornam as fibras G.657 ideais para instalações internas e de curta distância, proporcionando flexibilidade no projeto e na implantação de redes de acesso óptico.

No espaço do cliente o cabo drop poderá sofrer diversas avarias que poderão causar excessivas curvaturas, o que aumenta a atenuação ou até pode causar o

rompimento da fibra óptica dentro do cabo. A fibra óptica G.657 (A e B) apresenta menores perdas em dB do que as fibras de curvatura inferiores à G.652D, mostrando-se mais apropriada para utilização. A fibra G.657D pode apresentar uma perda de vários dB para um raio de curvatura de 15mm, enquanto a fibra G.657 apresenta uma perda menor do que 1 dB para o mesmo raio de curvatura (Nishioka, 2005). Duas categorias são definidas pela recomendação G.657 (A e B), porém apenas a categoria A possui as características ópticas compatíveis com a fibra óptica G.652D, como comprimentos de operação e PMD, sendo a mais apropriada para a utilização em campo.

3.3 Cálculo de atenuação

O cálculo de atenuações em redes ópticas é uma etapa crucial para garantir o desempenho adequado e a transmissão eficiente dos sinais de luz ao longo da fibra óptica. As atenuações referem-se à perda de potência óptica ao longo do caminho da luz, seja no sentido de transmissão (*downstream*) ou de retorno (*upstream*).

Várias fontes podem contribuir para a atenuação do sinal óptico, como a dispersão cromática, absorção do material da fibra óptica, curvaturas excessivas, conexões e emendas inadequadas, bem como perdas causadas por dispositivos passivos, como os splitters ópticos.

Para calcular as atenuações e saber se o ambiente da rede está apto a ter transmissões de boa qualidade, é essencial levar em consideração todos os elementos da rede óptica, como os comprimentos das fibras, o tipo de fibra utilizada, o número de conexões e emendas, a potência de transmissão do equipamento óptico (OLT e ONU) e a sensibilidade dos receptores ópticos. Além disso, é necessário considerar as características específicas das tecnologias utilizadas, como GPON ou XGPON, e as normas da ITU-T que regem cada uma delas.

Um dos principais objetivos do cálculo de atenuação é assegurar que o sinal de luz mantenha uma potência adequada em cada ponto da rede, de modo a garantir que os receptores ópticos possam detectar corretamente os dados transmitidos. Dessa forma, a qualidade e a confiabilidade da transmissão de dados são preservadas, evitando problemas como perda de informações e interrupções na conexão dos clientes. Logo é importante que seja desenvolvido um modelo

matemático capaz de fazer o cálculo teórico de todas as atenuações presentes na rede, com o objetivo de determinar qual classe de equipamentos deve ser utilizada, além de verificar se o modelo proposto segue as recomendações e pode funcionar, para só assim ser implantado em campo.

A Figura 14 apresenta os equipamentos que devem ser considerados no cálculo das atenuações dentro da arquitetura proposta.

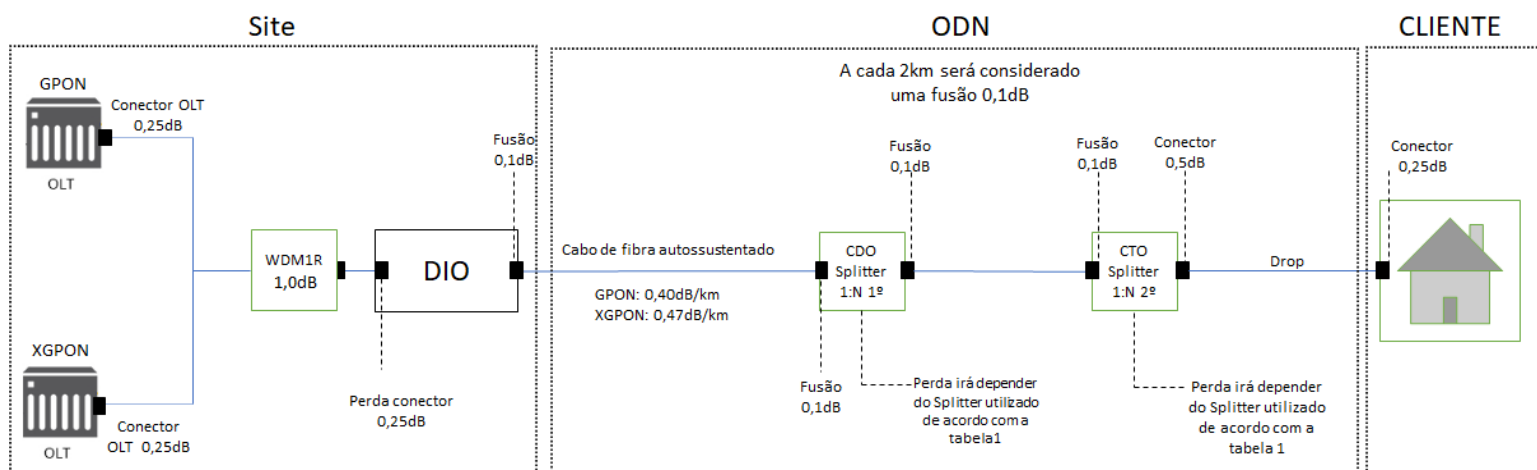


Figura 14 - Cálculo das atenuações da arquitetura proposta.

Fonte: Autor.

A determinação dos valores máximos e mínimos de atenuação em uma rede óptica é um fator crítico para garantir o correto funcionamento do sistema e a qualidade da transmissão de dados. Esses valores são influenciados pelo comprimento da rede óptica, ou seja, pela distância entre o transmissor e o receptor. Quanto maior for o comprimento da rede óptica, maior será a perda de potência do sinal de luz enquanto trafega pela fibra óptica, devido às inevitáveis perdas por dispersão e absorção ao longo do caminho. Portanto, o cenário com a maior distância possível entre uma OLT e uma ONU exigirá um valor máximo de atenuação projetada para garantir que o sinal óptico chegue com potência suficiente ao receptor para uma comunicação confiável. Por outro lado, o cenário com a menor distância entre o transmissor e o receptor exigirá um valor mínimo de atenuação projetada, pois as perdas ópticas serão menores em distâncias curtas, e será necessário ajustar os parâmetros para garantir que a potência do sinal não ultrapasse os limites de saturação dos receptores ópticos.

No projeto da rede óptica a atenuação é calculada observando todos os ganhos de potência e as perdas desde a saída do sinal de luz no transmissor até a sua chegada na recepção. Nesse sentido são levadas em consideração três parcelas.

O primeiro seria o conjunto de ganhos e perdas de potência no site, pois como já falado neste trabalho a OLT envia o sinal de luz com uma certa potência em dBm, que é determinada pela classe do equipamento. Neste ambiente o sinal de luz sai da OLT e passa pelo DIO (Distribuidor Interno Óptico). O DIO tem a função de acomodar corretamente os cabos internos de fibra óptica facilitando a sua conexão com os cabos que irão para a rua, e internamente nesse equipamento existem bandejas nas quais os cabos ópticos externos são acomodados e fundidos com cordões ópticos que serão terminados nos conectores do DIO. Os cordões ópticos, também chamados de *pigtails* possuem em suas extremidades um conector, e na outra ponta possui a extremidade livre para que seja feita a fusão (Huawei, 2010). O conector do cordão óptico será conectado em um passante dentro do DIO. Esse passante facilita a conexão com mais cordões que serão ligados de acordo com os equipamentos que irão ficar ligados a fibra. Nesse cenário devemos levar em consideração o fato de que neste projeto estarão funcionando duas tecnologias, e para existir essa coexistência é necessário ser adicionado ao site um equipamento chamado WDM1r. Nesse equipamento haverão cordões ópticos que sairão das portas PONs presentes nas OLTs GPON e XGPON, e sairão cordões para o DIO, havendo também atenuações devido a este equipamento.

Na segunda parcela foram consideradas as atenuações provenientes dos materiais e equipamentos utilizados na rede externa (ODN) até chegar na caixa de atendimento. No modelo proposto, é nesse estágio que haverá maiores atenuações, pois é quando serão somadas as atenuações devido a passagem da luz nos cabos, conectores e splitters ópticos, sendo esse último o mais responsável pela diminuição da potência do sinal óptico.

A terceira parcela está relacionada com a atenuação dos materiais utilizados para entregar o sinal óptico até a casa do cliente. Nesse estágio é levado em consideração as perdas provenientes do cabo drop em que também causa atenuação quando está transportando o sinal de luz, e dos conectores, no qual normalmente são utilizados dois, um para conectar o cabo drop na caixa de atendimento, e o outro para conectar o cabo drop a ONU que irá receber o sinal óptico.

Somando as perdas em dB descritas em cada estágio, desde a saída da OLT até a recepção pela ONU, podemos chegar na seguinte fórmula para calcular a atenuação total:

$$A_{Total} = A_{Site} [dB] + A_{ODN} [dB] + A_{Cliente} [dB] \quad (2.0)$$

Na qual:

- $A_{Site} [dB]$ = Atenuação proveniente dos materiais e equipamentos do site;
- $A_{ODN} [dB]$ = Atenuação causada pelo conjunto de materiais e equipamentos utilizados na parte externa;
- $A_{Cliente} [dB]$ = Atenuação dos materiais utilizados para instalação de um novo cliente na rede.

Para o cálculo da atenuação máxima e mínima da rede devemos levar em consideração as normas ITU para as diferentes classes de equipamentos presentes em toda a rede, pois para evitar situações de saturação e sobreposição de bit na transmissão, os limites para cada tecnologia devem ser respeitados, e conforme já definido neste trabalho, temos a seguinte equação que representa as atenuações máximas, médias e mínimas da rede óptica.

$$A_{Máxima} [dB] \geq A_{Média} [dB] \geq A_{Mínima} [dB] \quad (2.2)$$

A atenuação total no site pode ser calculada somando as perdas dos equipamentos e materiais que compõem a rede óptica desde o transmissor até a saída pela rua. A equação a seguir expressa a atenuação resultante no site.

$$A_{Site} [dB] = P_{Cliente} [dB] + A_{WDM1r} [dB] + A_{DIO} [dB] \quad (2.3)$$

Com essa equação chegaremos à atenuação do site, e essa atenuação não depende da distância ao cliente e da taxa de split da rede, pois ela só levará em

consideração as perdas dos conectores, do WDM1R e do DIO. As perdas ocasionadas pela utilização desses equipamentos são respectivamente 0,25dB, 1,0 dB e 0,35 dB. Desta maneira, utilizando a equação abaixo teremos a atenuação do site igual à:

$$A_{Site [dB]} = 0,25 \text{ dB} + 1,0 \text{ dB} + 0,35 \text{ dB} = 1,6 \text{ dB} \quad (2.4)$$

A segunda variável da Equação 2.0 se refere à rede externa. Esta parte será a que apresenta maiores valores de atenuação, uma vez que é nela que haverá as perdas devido a utilização de splitters e a própria atenuação causada dentro da rede óptica. Com o objetivo de atingir um maior aproveitamento das portas PON é neste estágio que deverão serem definidos os limites máximos da taxa de splittagem e de alcance da rede. A equação 2.5 irá permitir calcular a atenuação da rede externa:

$$A_{Rede [dB]} = (A_{fibra [dB]} \times D_{Distância}) + (A_{fusão [dB]} \times \sum_{Fusões}) + \sum A_{Splitters [dB]} \quad (2.5)$$

Logo a variável que representa os splitters terá que levar em consideração os splitters utilizados no primeiro nível que é o de divisão do pon, e o de segundo nível que é responsável pelo atendimento. Para chegar na atenuação do splitter da rede primária iremos somar a atenuação do splitter junto das atenuações causadas pela fusão de entrada e saída. Para os splitters da rede secundária consideremos as perdas causadas pelos splitters, junto da fusão de entrada e a perda do conector de saída, já que esse splitter faz parte do conjunto da caixa de atendimento, tendo em suas pontas conectores. A equação abaixo calcula a atenuação dos splitters da rede, e se observa que a variável da fusão nos splitters não foi considerada porque ela já está sendo considerada na equação 2.6.

$$\sum A_{Splitters [dB]} = (A_{Splitter \text{ Nível } 1 [dB]} + A_{Splitter \text{ Nível } 2 [dB]}) \quad (2.6)$$

A consideração das fibras G.652 e G.657 é de extrema importância para o cálculo da atenuação no sentido upstream em uma rede de fibra óptica. No caso do

sentido upstream, para o comprimento de onda de 1310nm (utilizado na tecnologia GPON), a atenuação é de 0,4 dB por quilômetro, enquanto para o comprimento de onda de 1290nm (utilizado na tecnologia XGPON), a atenuação é de 0,47 dB por quilômetro. Logo podemos considerar os limites do sentido upstream para o sentido downstream, pois nos dois sentidos são utilizados os mesmos materiais e equipamentos. No cálculo da atenuação resultante dentro do projeto de rede de fibra óptica, é de extrema importância considerar os cenários em que as maiores atenuações podem ocorrer. Ao prever e levar em conta as situações com maior perda de potência ao longo da rede, é possível garantir uma maior segurança e eficiência na transmissão dos sinais de luz. Dessa forma, a rede estará preparada para enfrentar desafios causados por possíveis agentes externos, minimizando o impacto de perdas de sinal e assegurando o correto funcionamento da rede em condições adversas.

Já para se calcular o número de fusões presentes na rede, deve se utilizar de um parâmetro que é usado normalmente quando se está se construindo uma rede de fibra óptica, que geralmente existe uma fusão a cada dois quilômetros em uma rede óptica, e a perda a se considerar deve ser de 0,1 dB por fusão (Huawei, 2010). Agora colocando esses valores dentro da equação 2.7 e 2.8, chegamos a:

$$A_{Rede\ GPON}[dB] = (0,4\ dB \times D_{Distância}) + (0,1dB \times \sum_{Fusões}) + \sum A_{Splitters})\ [dB] \quad (2.7)$$

$$A_{Rede\ XGPON}[dB] = (0,47dB \times D_{Distância}) + (0,1dB \times \sum_{Fusões}) + \sum A_{Splitters})\ [dB] \quad (2.8)$$

É observado que na equação que mede a atenuação para a tecnologia XGPON irá haver uma atenuação de 0,07 dB/km a mais. Isso ocorre devido ao comprimento de onda utilizado no upstream, que durante a passagem da luz na fibra ocasionará em uma atenuação um pouco mais alta quando se comparada com o GPON.

Para se calcular a perda dentro do ambiente do cliente devemos observar que a perda será padrão em todas as situações, visto que não depende de variáveis de projeto, e sim somente de instalação. O cálculo não irá considerar a atenuação do drop, visto que a distância que esse projeto considerou dá CTO até a casa do cliente

é de 150 metros. Levando em consideração a perda do conector da CTO 0,5 dB e a perda do conector da ONU 0,25 dB chegamos nos seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 A_{Cliente}[dB] &= (A_{Conector\ CTO} [dB]) + (A_{Conector\ ONU} [dB]) \\
 A_{Cliente} [dB] &= (0.50 [dB]) + (0.25 [dB]) \\
 A_{Cliente} [dB] &= 0.75dB
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

As perdas dos splitters irão depender de qual tipo de splitter será utilizado na construção da rede. Neste projeto em questão será utilizado splitters de 1:8 tanto na caixa de emenda como na caixa de atendimento, e considerando que a perda deste splitter é de 10,5 dB, podemos chegar nas seguintes equações:

$$A_{Total\ GPON}[dB] = 2,7dB + (0,4\ dB \times D_{Distância}) + (0,1dB \times \sum Fusões) + 21dB + 0,75dB \tag{2.10}$$

$$A_{Total\ XGPON}[dB] = 2,7dB + (0,47dB \times D_{dist}) + (0,1dB \times \sum Fusões) + 21dB + 0,75dB \tag{2.11}$$

A partir dessas fórmulas podemos chegar na atenuação total das duas tecnologias dependendo da distância considerada. Mas como esse projeto irá utilizar o pior caso de atenuação, será utilizado a atenuação total da tecnologia XGPON como referência para as simulações à frente.

3.4 Simulação

A avaliação da arquitetura proposta é essencial para garantir a viabilidade e o desempenho adequado da rede óptica. Essa análise é realizada a partir dos dados obtidos através de softwares especializados que permitem a construção e testes da rede. Entre os dados analisados estão as máscaras dos diagramas de olho dos sistemas GPON e XGPON, que fornecem informações importantes sobre a qualidade e a integridade dos sinais ópticos transmitidos. Além disso, é verificado se a taxa de erro de bits (BER) requerida para o bom funcionamento do sistema está sendo atendida durante as simulações da rede. A BER é um indicador crítico que determina

a confiabilidade da transmissão de dados, e é fundamental que ela esteja dentro dos limites aceitáveis para garantir a integridade das informações trafegadas.

Para realizar as simulações da rede, são utilizados dois softwares específicos, cada um com sua função e capacidades distintas. O primeiro software escolhido é o QGIS na versão 2.18.9, que é uma poderosa ferramenta de Sistema de Informações Geográficas (SIG) amplamente utilizada para visualizar, analisar e interpretar dados geográficos e de infraestrutura de redes. O segundo software selecionado é o Optisystem versão 19.0 da Optiwave System, que é uma plataforma avançada de simulação óptica que permite a construção de modelos complexos de sistemas de comunicação óptica. Com o Optisystem, é possível analisar o comportamento dos sinais ópticos em diversas condições e cenários, considerando as características específicas das tecnologias GPON e XGPON.

Esses softwares são fundamentais para a realização de simulações precisas e detalhadas, permitindo avaliar o desempenho da rede em diferentes cenários e otimizar a sua arquitetura para atender aos requisitos de transmissão de dados, garantindo a melhor qualidade de serviço para os usuários finais. Com base na análise dos dados obtidos nessas simulações, é possível tomar decisões estratégicas e ajustar a arquitetura da rede óptica, assegurando que ela esteja adequada para suportar o tráfego de dados de forma eficiente, confiável e com alto desempenho.

3.4.1 Qgis

O QGIS é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de Código Aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU. Ele é um projeto oficial da OpenSource Geospatial Foundation (OSGeo) que funciona em diversas plataformas e suporta inúmeros formatos de vetores, rasters, bases de dados e etc (Qgis, 2023).

Sendo uma ferramenta de software livre, o QGIS disponibiliza várias funcionalidades através de funções nativas e de complementos que estão em constante crescimento. Essas funções podem ser adicionadas pelo usuário dependendo de sua necessidade. Você pode visualizar, gerir, editar, analisar dados, e criar mapas para impressão (Qgis, 2023).

Uma das principais características do QGIS é a sua capacidade de lidar com uma ampla variedade de formatos de dados geoespaciais, incluindo formatos vetoriais

(como shapefiles, arquivos GeoJSON, arquivos KML) e formatos raster (como imagens georreferenciadas, mapas de elevação). Isso permite que os usuários importem, visualizem e analisem dados de diferentes fontes e tipos em um único ambiente de trabalho. Além disso, o QGIS oferece uma ampla gama de ferramentas de análise espacial que permitem aos usuários realizar operações como sobreposição de camadas, análise de proximidade, cálculo de áreas e volumes, interpolação, análise de visibilidade e muito mais. Essas ferramentas são fundamentais para a tomada de decisões em planejamento urbano, gestão ambiental, agricultura de precisão, análise de riscos naturais, entre outras áreas. Outro aspecto importante do QGIS é a sua comunidade ativa de desenvolvedores e usuários ao redor do mundo. Essa comunidade contribui para o desenvolvimento contínuo do software, criando novos plugins, aprimorando funcionalidades existentes e oferecendo suporte técnico e orientação para os usuários. Através de fóruns online, grupos de discussão e eventos de usuários, os usuários do QGIS podem trocar conhecimentos, compartilhar experiências e colaborar em projetos geoespaciais.

Uma característica notável do QGIS é a sua interface amigável e personalizável, que permite aos usuários adaptar o ambiente de trabalho de acordo com suas necessidades e preferências. Os usuários podem organizar painéis, criar atalhos, ajustar cores e temas, e instalar plugins adicionais para estender as funcionalidades do software de acordo com as demandas específicas de seus projetos. Além disso, o QGIS suporta a produção de mapas de alta qualidade e visualmente atraentes, oferecendo uma variedade de opções de estilo, simbologia e layout para os usuários criarem mapas personalizados e informativos. Isso torna o QGIS uma ferramenta valiosa não apenas para análise e processamento de dados, mas também para comunicação e apresentação de resultados em relatórios, apresentações e publicações.

O QGIS pode ser uma ferramenta muito útil para realizar projetos de redes GPON e XGPON devido à sua capacidade de lidar com dados geoespaciais e realizar análises espaciais. Aqui estão algumas maneiras de como você pode utilizar o QGIS para projetos de redes GPON e XGPON:

- **Análise de Cobertura:** Utilize dados de cobertura geoespacial para avaliar a distribuição ideal de pontos de acesso (OLT - Optical Line Terminal) e a cobertura da rede. Você pode importar mapas de cobertura de fibra óptica, imagens de satélite ou dados de levantamentos topográficos para visualizar a área de abrangência e identificar potenciais lacunas na cobertura.
- **Planejamento de Rotas de Fibra Óptica:** O QGIS permite traçar rotas para cabos de fibra óptica, levando em consideração fatores como topografia, obstáculos naturais e infraestrutura existente. Você pode criar linhas de distribuição que representem os trajetos ideais para os cabos ópticos e avaliar a viabilidade técnica e econômica de diferentes rotas.
- **Análise de Capacidade e Dimensionamento da Rede:** Utilize ferramentas de análise espacial do QGIS para estimar a capacidade de transmissão e dimensionar a infraestrutura da rede. Você pode realizar cálculos de atenuação, perda de sinal e capacidade de transmissão para determinar a configuração ótima da rede, incluindo a quantidade de divisores (splitters) e a distribuição de pontos de acesso.
- **Integração de Dados de Infraestrutura:** O QGIS permite integrar dados geoespaciais de infraestrutura existente, como postes, dutos, caixas de distribuição e edifícios, para planejar a instalação de equipamentos de rede GPON e XGPON de forma eficiente e minimizar custos de implantação.
- **Visualização e Comunicação de Projetos:** Utilize recursos de visualização do QGIS para criar mapas temáticos, diagramas de rede e representações tridimensionais da infraestrutura planejada. Isso facilita a comunicação com as partes interessadas, como clientes, autoridades reguladoras e equipes de construção, e ajuda a garantir uma compreensão clara dos objetivos e requisitos do projeto.
- **Análise de Viabilidade Econômica:** Utilize dados geoespaciais de custos de construção, preços de materiais e estimativas de mão de obra para realizar análises de viabilidade econômica e avaliar o retorno sobre o investimento (ROI) de projetos de redes GPON e XGPON.

Essas são apenas algumas maneiras de como o QGIS pode ser utilizado para projetos de redes GPON e XGPON. Combinando suas capacidades de análise espacial, visualização de dados e integração de informações, o QGIS pode ser uma ferramenta poderosa para planejar, projetar e implementar redes de fibra óptica de forma eficiente e eficaz

Utilizando o Qgis foi possível projetar uma rede de fibra óptica para o atendimento de uma região da cidade de Fortaleza, localizada no estado do Ceará. Essa rede será a utilizada para esse projeto como de referência para novos projetos que desejarem utilizar a tecnologia GPON coexistindo com a tecnologia XGPON. A Figura 15 mostra a área de atendimento da rede projetada. Por meio do Qgis foi possível criar arquivos de camadas que pudessem identificar no projeto os materiais e equipamentos utilizados na rede de fibra óptica.

Por meio dessas camadas foi possível retirar dados precisos de quantidades de caixas de atendimento utilizada, caixas de emenda utilizada, splitters, quantidades de PONS necessários para atender a região, distância máxima da rede de fibra óptica, quantidade de cabos utilizada entre outros dados muito importantes que deverão serem analisados em testes que irão ajudar a comprovar a possibilidade das tecnologias coexistirem.

Fonte: Autor.

O Optisystem é amplamente reconhecido como uma poderosa ferramenta para simulações de redes ópticas, sendo uma escolha frequente em diversos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento. Sua versatilidade e vasta biblioteca de dispositivos ópticos e elétricos permitem aos usuários projetar e simular redes de acesso PON de forma eficiente e precisa.

Além disso, o Optisystem oferece a oportunidade de testar dispositivos que, de outra forma, seriam caros e complexos de serem adquiridos e implementados em

experimentos reais. Dessa forma, a ferramenta possibilita um ambiente de testes mais econômico e seguro, garantindo uma abordagem mais eficiente no desenvolvimento de soluções para redes ópticas.

A capacidade de alterar as principais características dos componentes também é uma funcionalidade valiosa, pois permite aos pesquisadores avaliar o impacto dessas alterações no comportamento e desempenho do sistema óptico modelado. Isso torna o Optisystem uma ferramenta flexível para a otimização de parâmetros e aperfeiçoamento do projeto de redes ópticas.

Em suma, o Optisystem tem se destacado como uma escolha robusta e confiável para a simulação de redes ópticas, permitindo que pesquisadores, engenheiros e profissionais do setor de telecomunicações explorem diversas possibilidades e desenvolvam soluções inovadoras para atender às crescentes demandas por maior capacidade e qualidade em redes de acesso PON.

O Optisystem vem sendo utilizado constantemente em outros trabalhos que simulam redes de acesso PON, como uma poderosa ferramenta capaz de realizar simulações de redes ópticas (Optwave, 2023). A Figura 16 apresenta o modelo de simulação que será construído no Optisystem para simulação da arquitetura proposta neste trabalho.

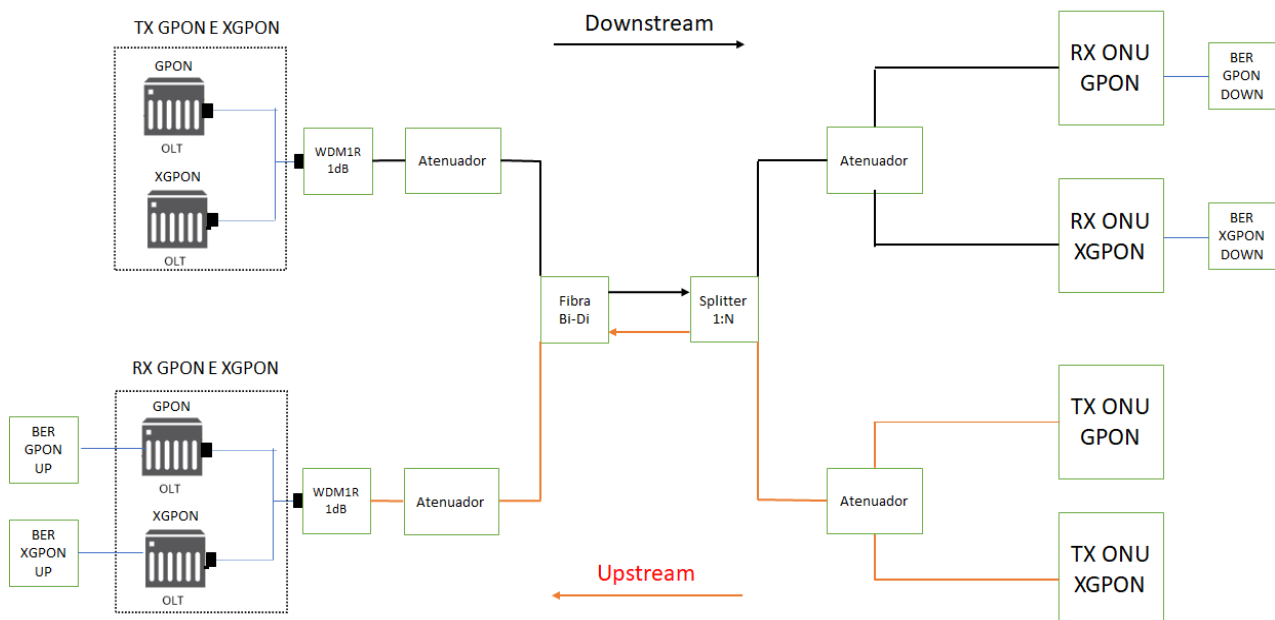


Figura 16 - Arquitetura no optisystem
Fonte: Autor

Para simular a saída de uma porta PON da OLT no optisystem é adicionado um transmissor óptico com laser SLM e modulação externa. Os sinais ópticos provenientes da OLT GPON e OLT XGPON são combinados pelo WDM1r, permitindo assim adicionar os dois sinais dentro de uma fibra óptica. Para simular a perda dos conectores das OLTs e dos DIOS, é adicionado um componente óptico chamado de atenuador.

Neste modelo em questão, a parte externa da rede é representada pelos componentes atenuadores, splitters, e a fibra óptica bidirecional que permite vir sinais de um lado e de outro sem precisar adicionar mais componentes. A fibra óptica bidirecional já representa a passagem do sentido upstream e downstream tanto para a tecnologia GPON como para a XGPON, e isso é porque ao se realizar as simulações, observa-se que a fibra óptica bidirecional é a responsável pela maior parte do tempo de simulação, e incluir outros caminhos iriam causar um aumento significativo no tempo de simulação. O comprimento da fibra óptica será o observado dentro da rede projetada no software Qgis, e o seu range máximo dependerá de todos os outros elementos, principalmente os splitters utilizados.

Com o intuito de otimizar o tempo de simulação e ainda assim obter resultados precisos, foi selecionado um splitter bidirecional para inclusão no modelo. A perda de inserção desse splitter é calculada como a soma das perdas correspondentes ao primeiro e segundo nível, juntamente com as perdas decorrentes das fusões de entrada e saída. Para simular as perdas relacionadas às fusões que ocorreram ao longo do trajeto, são inseridos dois atenuadores: um para o sentido downstream e outro para o upstream. Esses atenuadores permitem analisar as perdas por fusão no enlace óptico.

Com o objetivo de efetuar comparações e estudos, serão conduzidos testes referentes à taxa de splittagem. Inicialmente, a rede óptica será configurada com uma taxa de split de 1:64 (dois splitters de 1:8). Posteriormente, serão obtidos resultados para uma taxa de split de 1:32 (um splitter de 1:4 e outro de 1:8). Esses testes são de suma importância, uma vez que a taxa de splittagem impacta significativamente no alcance máximo da rede óptica. Por meio das simulações, será possível determinar com precisão o comprimento máximo que a rede será capaz de suportar em ambas as situações.

Após a divisão do sinal óptico pelo splitter óptico, é introduzido um atenuador bidirecional entre a ONU e o splitter. Esse atenuador tem como função simular as perdas provocadas pelos conectores presentes no cliente e na própria ONU. O sistema não possui em sua biblioteca um modelo pré-definido para a ONU, portanto, é necessário adicionar os componentes que compõem a estrutura dessa unidade para possibilitar sua simulação, esse sistema será um bloco com os dispositivos que simulam uma ONU. O bloco será responsável por receber o sinal do sentido downstream, e ele é composto por um filtro óptico, o qual está centrado na frequência de acordo com a tecnologia utilizada (1490nm para GPON e 1577nm para XGPON), um fotodetector APD, um filtro Thomson de ordem 4 e um regenerador. A inclusão do filtro Thomson é fundamental para a obtenção do diagrama de olho do sistema (ITU-T, 2003). Em seguida, é inserido um bloco regenerador, seguido pelo BER Analyzer, que permite a obtenção dos dados referentes ao diagrama de olho e a taxa de erro de bits.

Para a simulação devemos considerar algumas particularidades da tecnologia GPON e XGPON, na qual os fotodetectores tanto da tecnologia GPON como da XGPON serão do tipo APD, no downstream e upstream. No sentido de transmissão upstream, irá acontecer o mesmo que no downstream, na qual existe um transmissor em cada ONU do tipo SLM gerando um sinal óptico que irá seguir para um atenuador adicionado no sistema para representar as perdas devido aos conectores. Após a passagem do sinal óptico pelos splitters e o atenuador da estação, o sinal óptico irá passar pelo filtro WDM1r e chegará ao receptor da OLT que irá receber um sinal de comprimento de onda de acordo com a tecnologia que for o equipamento. O receptor da OLT possui a mesma do receptor da ONU, o que torna possível a visualização do diagrama de olho e a obtenção da BER do upstream. Os receptores da OLT GPON e da OLT XGPON são do tipo APD.

4 Resultados

Neste capítulo é apresentado os resultados das simulações realizadas utilizando o software Optisystem. Diversos testes foram conduzidos, considerando os parâmetros discutidos nos capítulos anteriores. As simulações foram projetadas para avaliar o desempenho da arquitetura de rede proposta, que permite a coexistência das tecnologias GPON e XGPON. Foram analisados cenários com diferentes taxas de splitagem, representando situações reais de funcionamento da rede óptica.

4.1 Resultados do cálculo de Power Budget

Com o intuito de se atingir a melhor eficiência possível dentro da arquitetura proposta iremos utilizar equipamentos do tipo C+ para o GPON, e para o XGPON será considerado equipamentos da classe N2, pois como informado em capítulos

anteriores essas classe para as duas tecnologias possuem uma potência maior na saída tanto na OLT como na ONU, o que ajuda em um projeto de rede mais eficiente capaz de alcançar maiores distâncias. Esses tipos de equipamentos também possuem uma ótima recepção, o que irá ajudar na boa eficiência do projeto.

A topologia utilizada para calcular a atenuação da rede de acesso em função da distância para a taxa de split de 1:64 é apresentada na Figura 17.

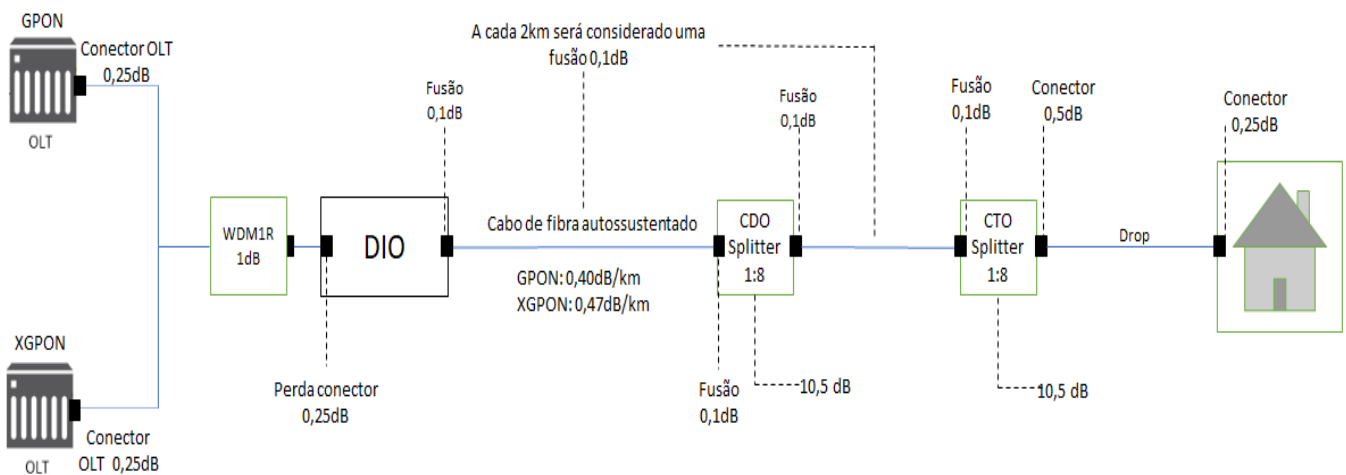


Figura 17 - Rede projetada para cálculo da atenuação com taxa de splitagem de 1:64.

Fonte: Autor.

A arquitetura proposta para esse trabalho inicialmente foi pensada para atender até 64 clientes utilizando uma porta PON, e para se chegar a esse número a estrutura viria a ter um splitter de 1:8 no primeiro nível e outro de 1:8 no segundo, cada um com atenuação máxima de até 10,5 dB. Logo para fins de cálculo de atenuação devemos considerar sempre a perda de potência máxima para cada equipamento, representando assim o pior caso para cálculo do *Power Budget*. Devido à perda dos splitters não será preciso se preocupar com a sensibilidade mínima dos equipamentos, já que se somadas as perdas iríamos ter uma atenuação de 21,0 dB, já ultrapassando o mínimo imposto para o bom funcionamento dos equipamentos.

Para a conexão de fibras ópticas, é comum utilizar conectores SC-APC (*Angled Physical Contact*) e SC-UPC (*Ultra Physical Contact*). O conector SC-APC é mais amplamente empregado devido ao seu corte em um ângulo de 8°, que permite que o feixe de luz entre na fibra e reflita em suas paredes internas, evitando qualquer

retorno de luz causado por choques internos. Esse design especial ajuda a minimizar as perdas de reflexão. Tanto o conector SC-APC quanto o SC-UPC têm uma perda média de cerca de 0,25 dB na conexão. Além disso, quando utilizado um conector de campo, a perda adicional é de 0,5 dB, totalizando uma perda de 0,75 dB. Essas perdas devem ser consideradas nos cálculos de atenuação da rede óptica, pois podem afetar o desempenho do sistema de comunicação. Para calcularmos a perda de conexões no site, é só somar as perdas das conexões da OLT com as perdas do WDMr1 e do DIO, o que totaliza 1,6dB de atenuação.

Então neste cenário de atendimento de até 64 clientes por porta PON, e considerando os piores cenários de cada equipamento, teremos a seguinte fórmula para a atenuação total do percurso até a casa do cliente:

$$AG_{pon} [\text{dB}] = 1,6\text{dB} + (0,40 \text{ dB} \times D_{\text{dist}}) + (0,1\text{dB} \times \text{Dist}/2\text{km}) + 21\text{dB} + 0,75\text{dB} \quad (3.0)$$

$$AX_{gpon} [\text{dB}] = 1,6\text{dB} + (0,47 \text{ dB} \times D_{\text{dist}}) + (0,1\text{dB} \times \text{Dist}/2\text{km}) + 21\text{dB} + 0,75\text{dB} \quad (3.1)$$

As equações acima apresentam a atenuação para as duas tecnologias utilizadas nesse projeto, levando em conta a atenuação máxima dos dois splitters de 1:8 adicionados na rede, e dos diversos dispositivos utilizados para fechar a comunicação entre a OLT e a ONU dos clientes. Logo é muito importante se considerar a atenuação máxima desses equipamentos já que será de bastante importância para as simulações no optisystem, pois cada atenuação dessa será levada em conta, nos dando a certeza se a arquitetura idealizada será capaz de funcionar com as duas tecnologias funcionando corretamente e respeitando todos as especificações ITU.

A Figura 18 apresenta a topologia utilizada para calcular a atenuação da rede óptica em função da distância, utilizando um splitter de 1:4 e um splitter de 1:8, resultando em uma razão de 1:32. Nota-se que a estrutura se assemelha à utilizada para a rede externa com razão de 1:64, sendo a única alteração a composição dos splitters.

Nessa arquitetura temos o splitter de primeiro nível de 1:4 com atenuação de 7,3 dB, e o splitter de segundo nível é de 1:8 com atenuação de 10,5 dB que são os valores máximos de atenuação admitidos para estes componentes. De forma

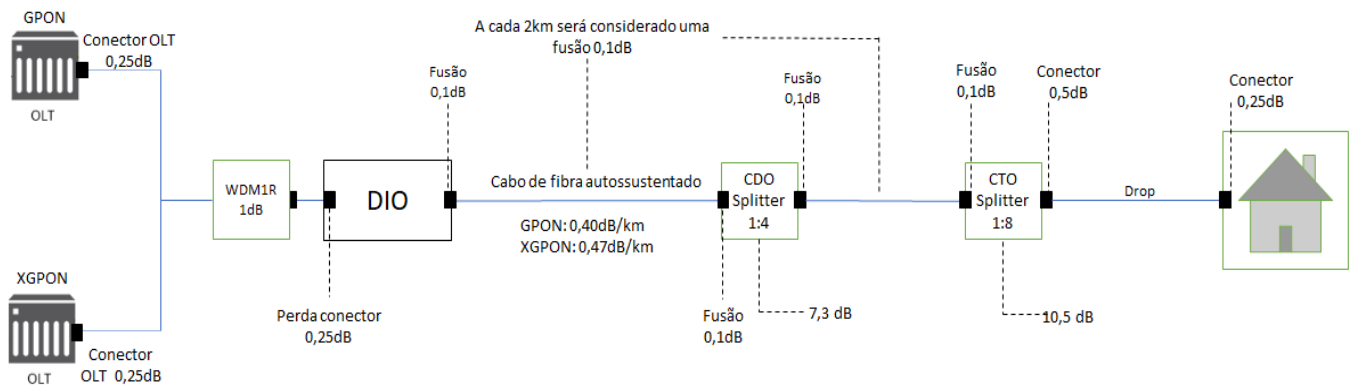
semelhante ao modelo anterior, é considerado o pior caso da atenuação dos splitters para cálculo do Power Budget. Serão consideradas também três fusões ópticas com perda de 0,1 dB cada, mais um conector de campo.

Figura 18 - Representação do cálculo das atenuações com utilização do splitter 1x4
Fonte: Autor

Novamente a soma das perdas dos splitters utilizados no modelo em questão o já ultrapassam a atenuação mínima imposta pelos equipamentos do tipo C+. Conforme o modelo anterior, também será adicionado a perda de 0,1 dB a cada dois quilômetros de rede. A perda por conexão para os conectores SC-APC está sendo consideradas e conectores de campo é de 0,25 dB e 0,5 dB respectivamente. Assim teremos as equações abaixo que representam a atenuação total considerada de cada tecnologia para esse modelo:

$$AGpon[dB]=1,6dB + (0,40 \text{ dB/km} \times Ddist) + (0,1dB \times Dist/2km) + 17,8dB + 0,75dB \quad (3.2)$$

$$AXgpon[dB]= 1,6dB + (0,47dB/km \times Ddist) + (0,1dB \times Dist/2km) + 17,8dB + 0,75dB \quad (3.3)$$



Observando as equações dos dois modelos, é notado que a única variável que falta para o cálculo da atenuação total é a distância da rede, e sabendo com qual potência de sinal deve chegar nos receptores, podemos calcular a distância máxima da rede. Nos capítulos anteriores foram informados os dados de potência de transmissão e limite de recepção para cada classe de equipamento tanto GPON como XGPON, e como falado anteriormente serão utilizados equipamentos da classe C+ para o GPON, e N2 para o XGPON. Desta forma podemos verificar a distância máxima

em que se utilizando cada tecnologia essas duas topologias podem chegar, sempre respeitando os limites de atenuação dos equipamentos.

4.2 Resultados da simulação

Com o propósito de avaliar a arquitetura proposta, será feito uso do software QGIS para extrair dados do projeto desenvolvido no sistema. Esses dados serão, então, incorporados à simulação utilizando o OptiSystem. Ao combinar os dados analisados ao longo deste trabalho, pretendemos verificar se o conjunto funcionará adequadamente, atendendo às especificações de cada tecnologia.

Portanto, é essencial utilizar três dados fundamentais que serão obtidos através das camadas criadas no software OptiSystem para analisar o desempenho do projeto. Esses dados incluem a potência óptica, a taxa de erro de bits e o diagrama de olho. Essas métricas serão cruciais para avaliar a eficiência e a confiabilidade da arquitetura proposta, garantindo que o sistema funcione conforme o esperado.

4.2.1 Potência óptica

O power meter é um medidor de sinal óptico geralmente utilizado por provedores de internet para medir a potência e a perda em equipamentos de telecomunicações. Para a medição da potência óptica no Optisystem devemos adicionar o dispositivo da biblioteca que representa o power metter ligado aos conjuntos que representam os transmissores da OLT e da ONU. A Figura 19 representa como ficará a estrutura no Optisystem para a utilização do power meter.

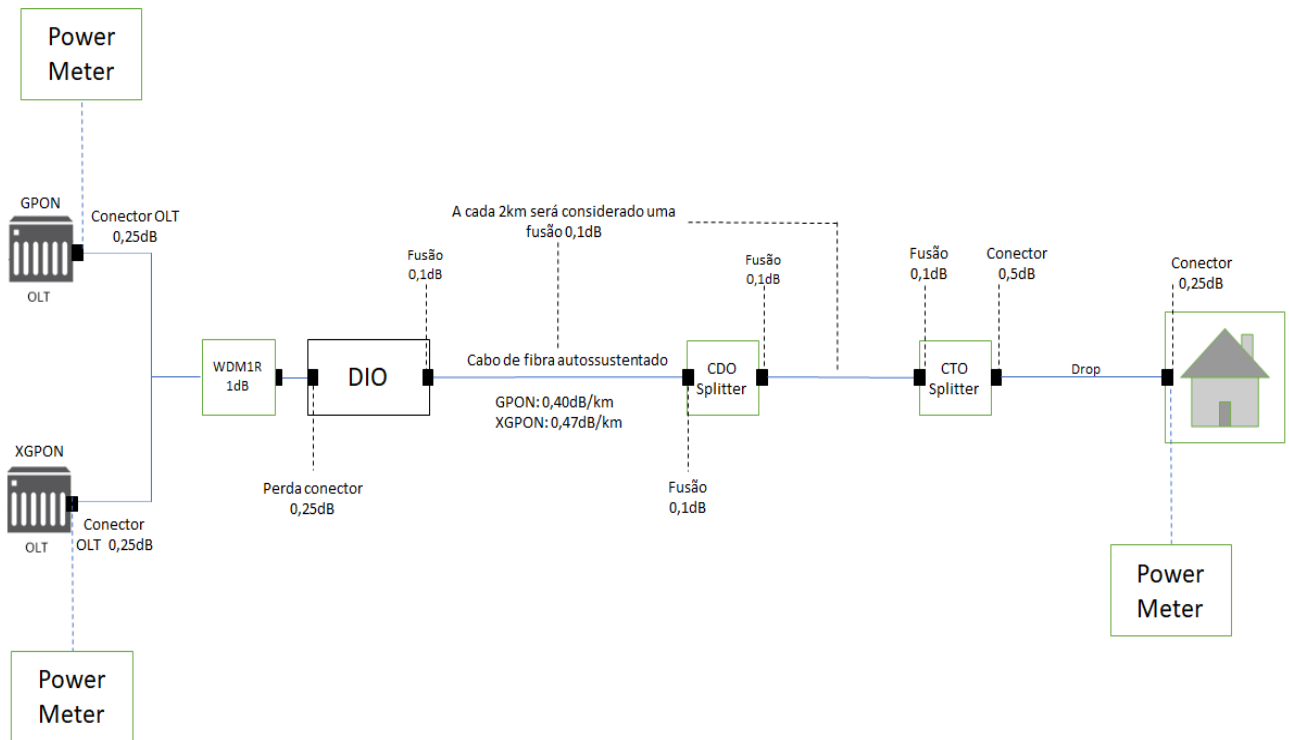


Figura 19 - Estrutura para medição de potência utilizando power metter.
Fonte: Autor.

Observa-se que o power meter é conectado tanto nas portas transmissoras das OLTs quanto nas ONUs, permitindo medir a potência óptica de saída tanto no sentido downstream quanto no sentido upstream. Ao medir a potência óptica em ambos os sentidos, é possível verificar a integridade do sistema de transmissão e recepção, garantindo que a potência do sinal seja adequada para atender aos requisitos de desempenho, pois valores muito altos ou muito baixos de potência podem indicar problemas na rede, como atenuação excessiva ou problemas de conexão, que podem afetar a qualidade do serviço e a taxa de erros de transmissão.

4.2.2 Taxa de erro de bits (BER)

A taxa de erro de bits é de fato um dos principais indicadores utilizados em redes de telecomunicações. Ela quantifica a proporção de bits recebidos erroneamente em relação ao total de bits enviados durante um determinado período de tempo. A equação número 4 descreve como calcular a BER:

$$\text{BER} = \text{NBits errados} / \text{NBits transmitidos} \quad (4.0)$$

Não existe uma unidade que defina a BER, ou seja, ela é adimensional. Ela pode ser expressa como uma potência 10, ou um percentual. Para tecnologias PON a BER deve ser no mínimo 10^{-10} para se ter uma transmissão de qualidade, sem que haja interrupções devido a perdas de bits. Manter uma BER baixa é fundamental para evitar problemas de desempenho na transmissão de dados, garantindo uma comunicação eficiente entre a OLT e as ONUs na rede PON. É importante realizar medições e ajustes adequados nos parâmetros de transmissão para atingir e manter uma BER adequada, permitindo que os serviços de internet e outros dados sejam entregues de forma confiável aos usuários finais.

4.2.3 Diagrama de olho

O diagrama de olho é uma ferramenta crucial na avaliação do desempenho de sistemas de telecomunicações, especialmente em transmissões digitais de alta velocidade. Essa representação gráfica permite visualizar a forma e a qualidade dos sinais recebidos em um ponto específico do sistema, facilitando a análise de diversos parâmetros importantes. Ele recebe esse nome devido à sua semelhança com a forma de um olho humano, com uma abertura central e "pálpebras" superior e inferior. Ele é construído pela superposição de várias formas de onda de bits consecutivas, permitindo identificar padrões de distorção, jitter e atenuação que podem afetar a integridade do sinal (Silva, 2017).

A análise do diagrama de olho possibilita avaliar a margem de sinal, a taxa de erro de bits (BER), a presença de ruídos e outras características relevantes para a comunicação de dados em alta velocidade. É uma ferramenta essencial no desenvolvimento e otimização de sistemas de transmissão digital, permitindo tomar decisões de projeto e ajustes nos parâmetros para garantir a confiabilidade e a eficiência da transmissão de dados. A figura 20 demonstra um diagrama de olho.

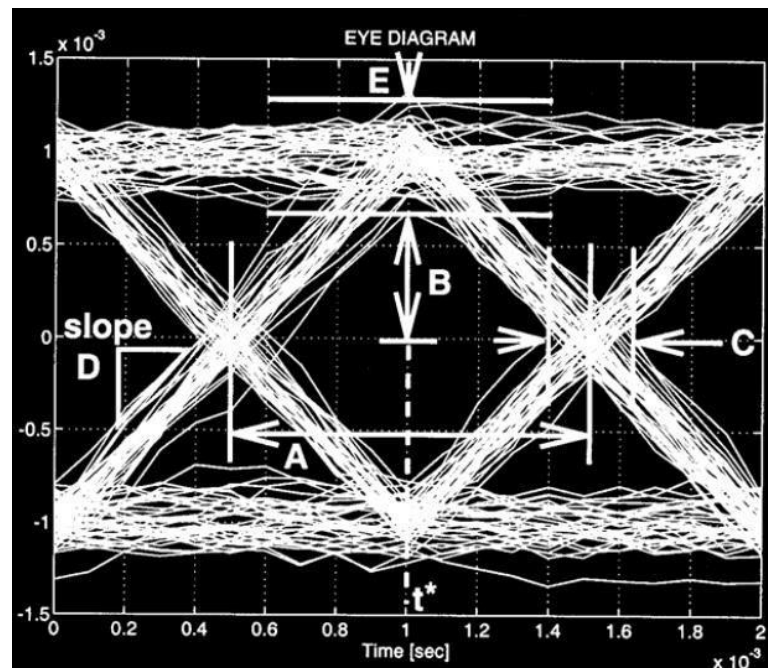


Figura 20 - Diagrama de olho.
Fonte: FE. UP.

Onde:

- A – Intervalo de tempo de amostragem;
- B – Margem de decisão sobre o ruído;
- C – Distorção dos cruzamentos por zero;
- D – Declive (sensibilidade ao erro de temporização);
- E – Distorção máxima;

Para o diagrama de olho quanto mais aberto for a sua abertura vertical do olho, menor será a interferência intersimbólica. No caso de sua abertura horizontal, quanto maior for ela, maior será a imunidade do receptor à fase de amostragem e ao Jitter de temporização (Silva, 2017).

Neste trabalho em questão iremos utilizar o optisystem para obter o diagrama de olho tanto no sentido upstream como no downstream para as duas tecnologias utilizadas. Para obter o diagrama no sentido downstream será adicionado um componente que faz parte da biblioteca na arquitetura, e ele será ligado no conjunto que representa a recepção de sinal na ONU, e no sentido downstream esse

componente será ligado no conjunto que representa a recepção de sinal da OLT. As Figuras 21 e 22, demonstram a arquitetura utilizada no optisystem para se obter o diagrama de olho nos dois sentidos.

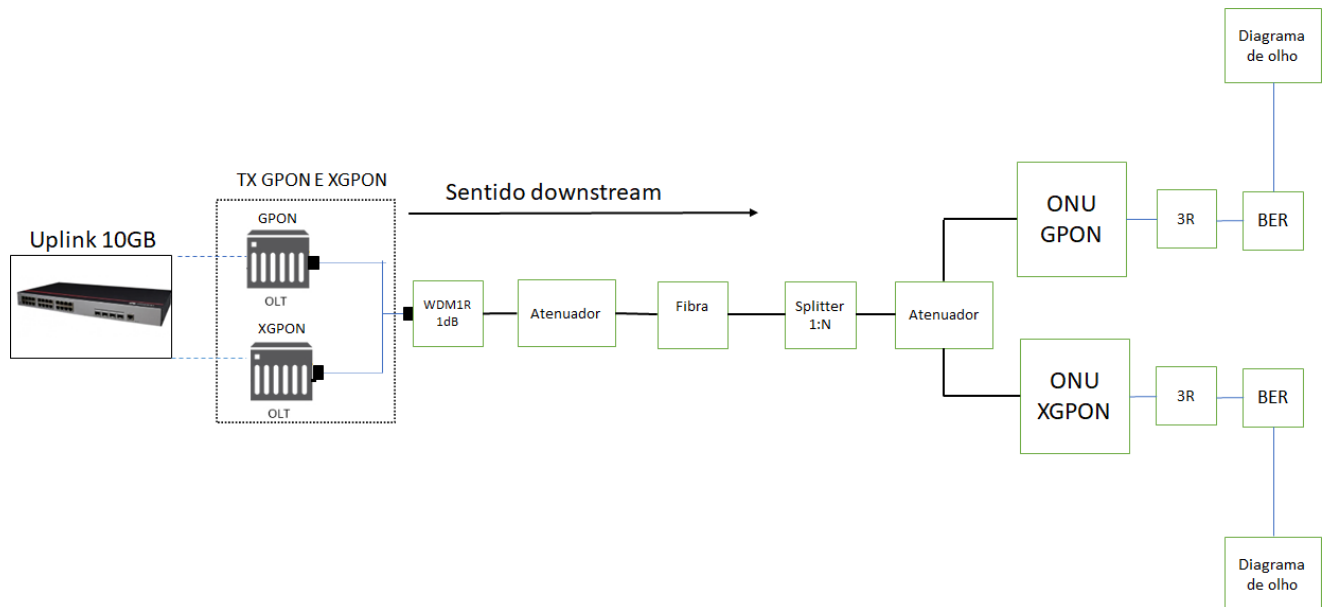


Figura 21 - Estrutura para retirada do diagrama de olho no downstream.
Fonte: Autor.

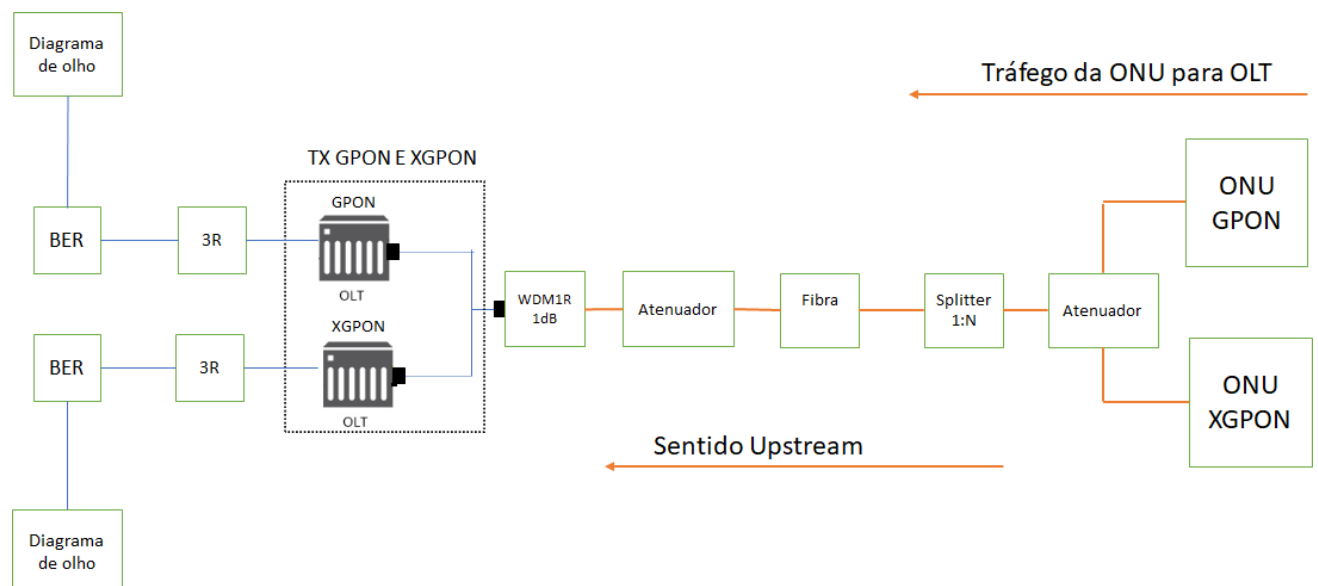


Figura 22 - Estrutura para retirada do diagrama de olho no upstream.
Fonte: Autor

4.3 Análise do projeto de rede Qgis

Com o objetivo de utilizar esse modelo de arquitetura para projetos reais, foi necessário construir a rede no software Qgis para coletar dados sobre a rede projetada, e utilizá-los em simulações utilizando o Optisystem.

Para a construção da rede em questão foi necessário levantar alguns dados sobre a quantidade de residências naquela região, pois antes da rede ser construída é necessário saber qual a quantidade potencial de clientes o provedor deseja atender, a concorrência de outros operadores, e sabendo disso ele consegue decidir quantos clientes ele deseja atender na região e qual será a largura de banda máxima que ele deseja oferecer. Logo, sabendo-se da quantidade de clientes que se deseja atender, será possível saber qual a quantidade de CTOs que serão utilizadas e a quantidade de PONs que deverão compor o projeto para alimentá-las. Sabendo-se disso outros dados estarão disponíveis para estudo como a distância máxima a qual o projeto deverá ter para atender todos esses clientes. A Figura 23 apresenta o projeto para a região. Para cobrir a região da área demarcada foi necessário serem adicionadas 184 CTOs com splitter de 1x8 para o atendimento.

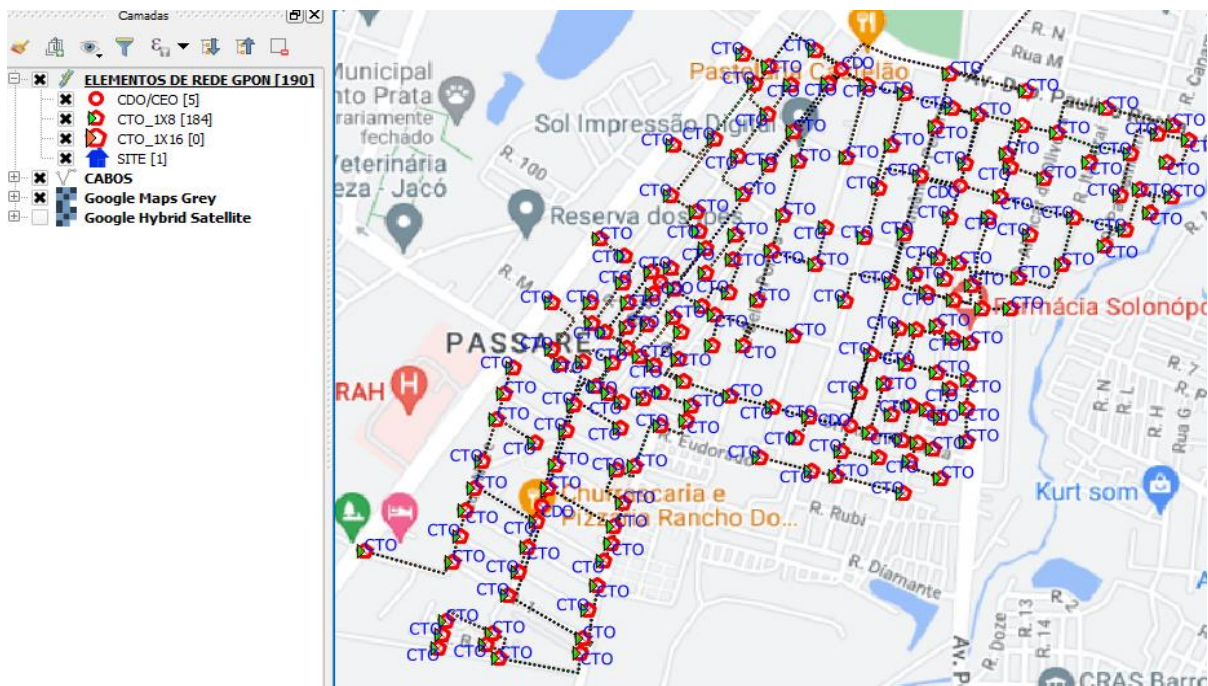


Figura 23 - Projeto Qgis
Fonte: Autor

Com o projeto pronto podemos identificar aquela CTO no qual será a mais distante da fonte de transmissão. Por meio da ferramenta de medição de distância do Qgis foi possível medir a distância máxima a qual esse projeto atende. A Figura 24 mostra a CTO mais distante, e a distância dela da OLT é de 4,169 km. Apesar de a CTO mais distante estar a 4,169 km devemos levar a consideração a distância do drop até a cada do cliente. Para esse projeto será utilizada a distância máxima da CTO até o cliente de 150 metros. Como esse projeto tende a trabalhar com uma situação real da rede, a distância máxima será considerada de 4,5km.

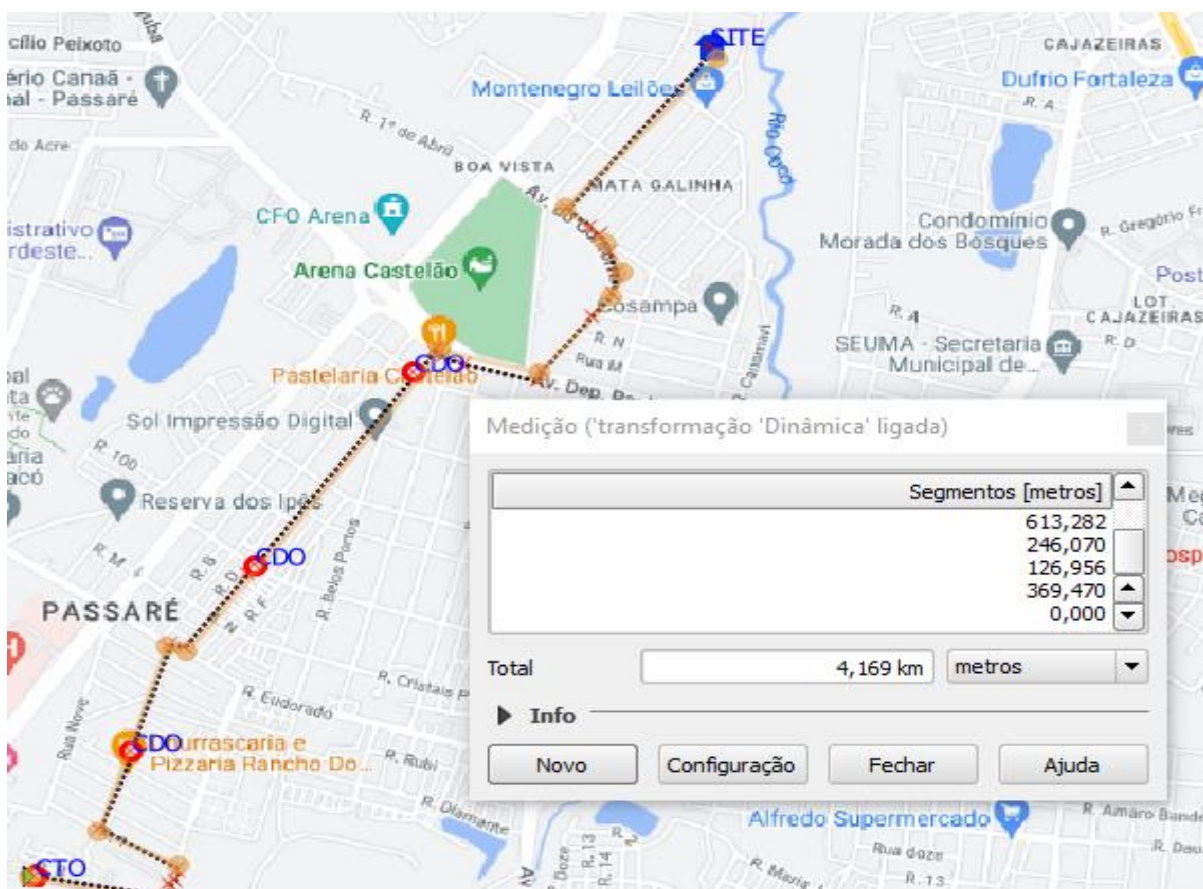


Figura 24 - Representação da CTO mais distante no projeto
Fonte: Autor

Sabendo a distância máxima da OLT e a CTO, podemos utilizar a equação mostrada nos capítulos anteriores para calcular a atenuação nas duas tecnologias, com o splitter de primeiro nível de 1:4 e 1:8:

$$AGPON\ 1x4[dB] = 1,6dB + (0,40dB \times 4,5km) + (0,1dB \times 2,25) + 17,8\ dB + 0,75\ dB = 22,17dB \quad (5.0)$$

$$AGPON\ 1x8\ [dB] = 1,6\ dB + (0,40\ dB \times 4,5) + (0,1dB \times 2,75) + 21\ dB + 0,75\ dB = 25,37\ dB \quad (5.1)$$

$$AXGPON\ 1x4[dB] = 1,6dB + (0,47\ dB \times 4,5) + (0,1\ dB \times 2,75) + 17,8\ dB + 0,75\ dB = 22,26dB \quad (5.2)$$

$$AXGPON\ 1x8\ [dB] = 1,6dB + (0,47\ dB \times 4,5) + (0,1\ dB \times 2,75) + 21\ dB + 0,75\ dB = 25,46\ dB \quad (5.3)$$

A partir dos cálculos de atenuações podemos observar que a atenuação em todo o trecho não ultrapassa os limites para recepção do sinal transmitido para equipamentos C+ no GPON e N2 no XGPON, confirmando assim via cálculo que para o projeto em questão podemos adotar a coexistência de rede GPON e XGPON em uma mesma estrutura de rede de fibra óptica.

Outra informação importante que podemos retirar com o projeto pronto é a quantidade de pons que devemos utilizar para ativar todas as CTOs do projeto. A equação 6.0 e 6.1 mostram o cálculo para se descobrir a quantidade de portas PONs que será necessária para atender o projeto feito no Qgis. Essas equações servem para as duas tecnologias, pois como o projeto irá compartilhar a estrutura para o GPON e XGPON, é importante que haja a mesma quantidade de PONs nas duas situações de atendimento, pois qualquer adição de equipamento que não seja especificado nas recomendações ITU podem inviabilizar a coexistência das tecnologias.

$$N_{Pons} = \frac{Q_{Ctos}}{\text{Spliiter } 1^{\circ} \text{ nível } 1x4} = (184/4) = 46 \text{ pons} \quad (6.0)$$

$$N_{Pons} = \frac{Q_{Ctos}}{\text{Spliiter } 1^{\circ} \text{ nível } 1x8} = (184/8) = 23 \text{ pons} \quad (6.1)$$

4.4 Largura de Banda

A Largura de Banda (Bandwidth) é um termo muito utilizado na área de telecomunicações pois ela é a medida de capacidade de transmissão de um meio, determinando qual a velocidade com que os dados são transmitidos. A largura de banda é um fator muito importante para a concorrência no mercado de provedores,

pois a todo instante provedores de internet tentam inovar oferecendo planos e internet nunca vistos antes no mercado, conseguindo assim uma parcela maior dos números de clientes. Mas apesar dos provedores estarem oferecendo planos de internet com cada vez mais largura de banda, essa corrida de mercado tem encontrado certas dificuldades, pois a grande maioria dos provedores de internet brasileiro ainda utilizam a tecnologia GPON como o seu principal meio de levar internet a casa de seus clientes. Isso tem sido uma grande barreira, pois o GPON é limitado a uma largura de banda de 2,5 Gbps no downstream e 1,25 Gbps no upstream, o que caracteriza baixa quantidade de banda para distribuir a vários clientes. Um dos objetivos desse trabalho foi justamente encontrar um modelo no qual pudesse resolver esse problema da limitada quantidade de banda a que os provedores tem disponível para distribuir a seus clientes.

O XGPON veio com uma proposta de oferecer 10 Gbps no sentido downstream e 2,5 Gbps no sentido upstream, dando a possibilidade de os provedores oferecerem planos de internet com uma maior quantidade de banda.

Com os dados coletados neste trabalho, podemos calcular a banda média disponível para o projeto construído no Qgis. As equações 8.0 e 8.1 irão calcular a banda média por PON, utilizando o splitter de 1x8 como primeiro nível:

$$L_{BandaGPON} = \frac{2,5Gbps}{64} = 39,06 \text{ Mbps} \quad (8.0)$$

$$L_{BandaXGPON} = \frac{10Gbps}{64} = 156,25 \text{ Mbps} \quad (8.1)$$

Utilizando o splitter de 1x4 teremos as seguintes larguras de bandas para as tecnologias:

$$L_{BandaGPON} = \frac{2,5Gbps}{32} = 78,12 \text{ Mbps} \quad (8.2)$$

$$L_{BandaXGPON} = \frac{10Gbps}{32} = 312,50 \text{ Mbps} \quad (8.3)$$

A análise dos resultados dos cálculos demonstra que a tecnologia XGPON proporciona uma quantidade média de banda disponível para cada usuário do PON

significativamente maior em comparação com a GPON. Essa diferença é observada devido ao maior potencial de transmissão de dados que a tecnologia XGPON oferece, o que permite uma maior capacidade de entrega de banda para cada cliente conectado à rede.

Além disso, é interessante notar que a troca do splitter de 1:8 do primeiro nível para um splitter de 1:4 resulta em um aumento ainda maior da banda disponível. Isso acontece porque ao reduzir a quantidade de clientes que podem se conectar ao PON, cada um deles terá uma parcela maior da capacidade total de banda disponível, resultando em um melhor desempenho individual.

4.5 Simulação no Optisystem

Nos capítulos anteriores deste trabalho foram discutidas diversas especificações que deveriam serem seguidas para que pudéssemos chegar na coexistência da tecnologia GPON e XGPON em uma mesma rede de fibra óptica.

Com o objetivo de verificar se a proposta de arquitetura desse trabalho seria viável para conter a coexistência, foi necessário a utilização do software optisystem para que pudéssemos simular um ambiente chegasse o mais próximo possível da realidade, já que os custos para se montar um ambiente real seriam muito caros, não sendo possível utilizarmos eles em condições reais para que houvessem testes para a comprovação. A Figura 25 mostra como ficou toda a estrutura para a simulação do projeto no optisystem.

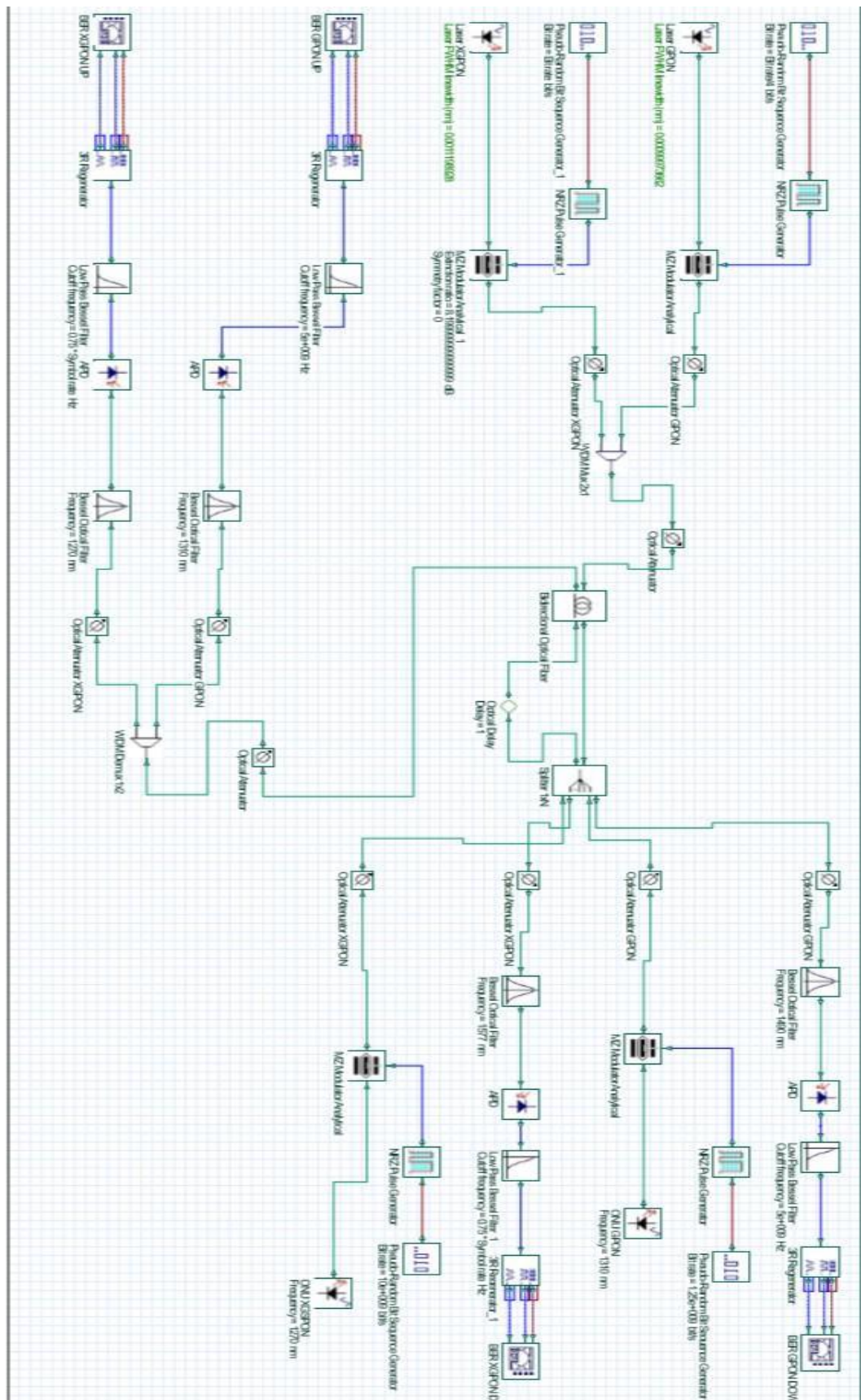


Figura 25 - Arquitetura montada no Optisystem.
Fonte:Autor.

A utilização do software Optisystem permitiu a criação de um modelo de simulação que representa com precisão a arquitetura proposta na metodologia. Apesar de não contar com os equipamentos prontos na biblioteca do software, foi possível adicionar componentes similares que simulam o funcionamento dos equipamentos reais, permitindo uma simulação precisa e realista da rede óptica. Foram adicionados blocos de medição de potência óptica para ajustar a potência de saída dos transmissores da OLT e da ONU, de modo a garantir que os valores estejam de acordo com as recomendações da ITU. Isso é fundamental para verificar se a rede está operando dentro dos limites adequados e para garantir o bom desempenho da transmissão de dados. A simulação da ONU foi realizada adicionando um bloco composto por um transmissor, um atenuador e um medidor de potência antes do bloco de recepção, que consiste em um fotodetector, filtro e analisador BER. Essa abordagem permite modelar o funcionamento da ONU de forma precisa e realista, simulando os componentes essenciais para o recebimento e transmissão do sinal óptico.

Para garantir a confiabilidade dos resultados da simulação, foi necessário definir a sensibilidade dos receptores ópticos. Essa sensibilidade deve ser ajustada para ser a mesma dos equipamentos da classe C+ para a tecnologia GPON e N2 para a tecnologia XGPON. A sensibilidade é um parâmetro importante, pois representa a menor potência de entrada necessária para garantir uma BER de 10^{-10} , ou seja, uma taxa de erro de bits extremamente baixa, assegurando a qualidade e confiabilidade da comunicação.

Além disso, também foi adicionado na simulação o atenuador, com o objetivo de simular as perdas causadas pelos conectores da ONU e do cliente. Essa perda é relevante para garantir que a potência óptica esteja dentro dos limites necessários para o bom funcionamento da rede.

As Figuras 26 e 27 apresentam os modelos utilizados para representar a ONU para as duas tecnologias.

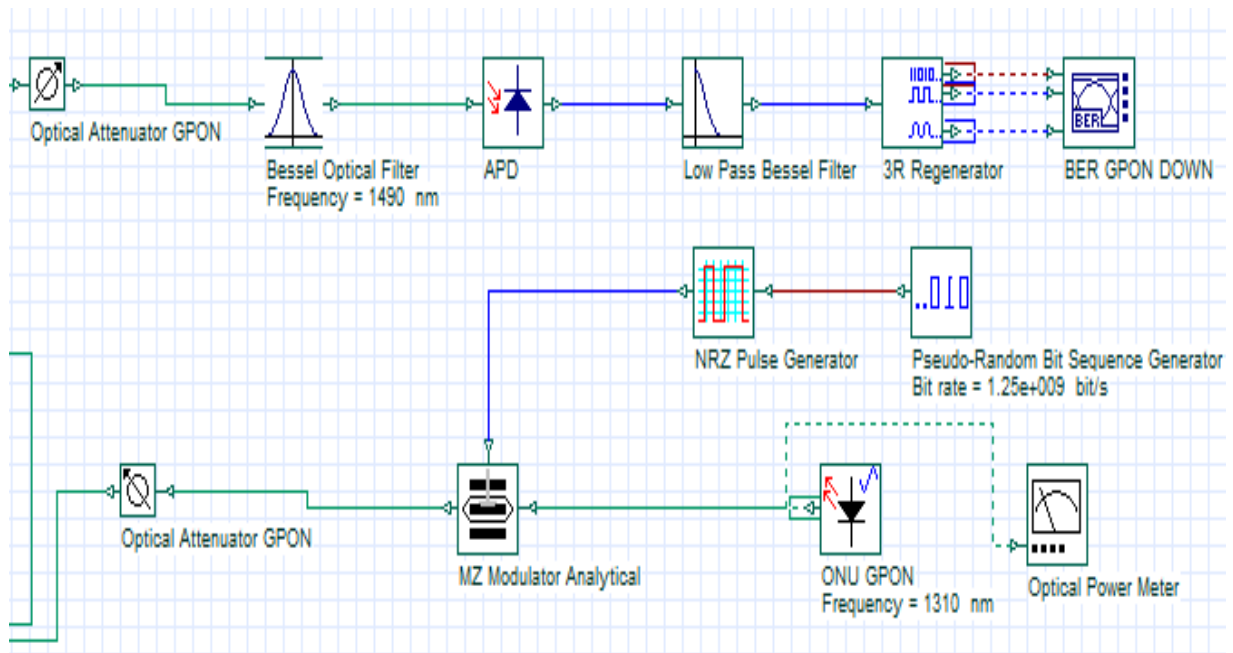


Figura 26 - Representação de ONU GPON no optisystem
Fonte: Autor.

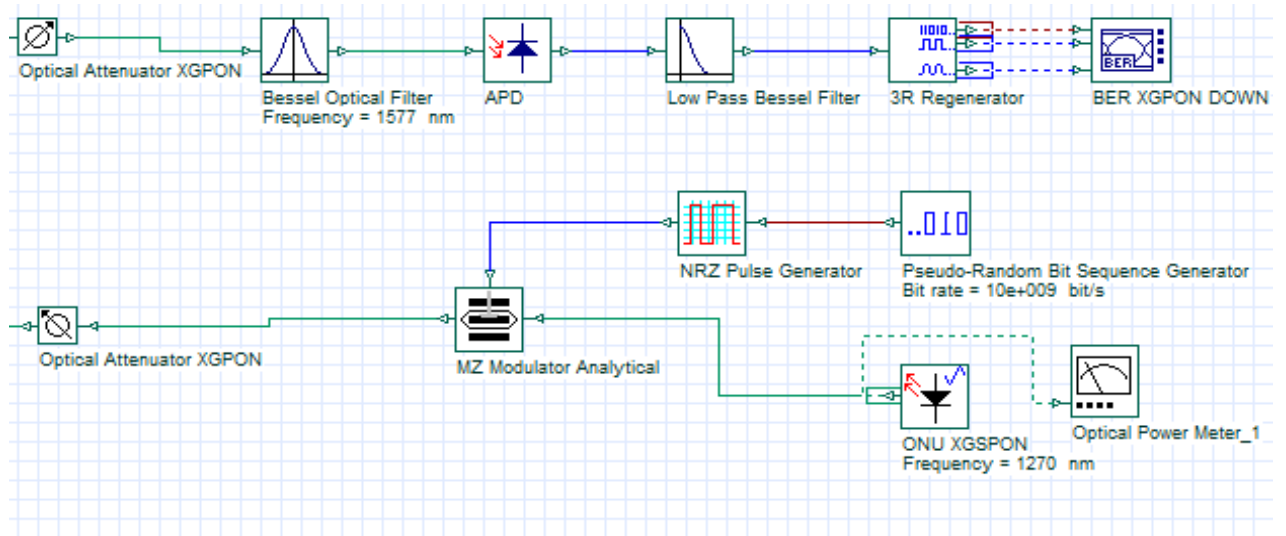


Figura 27 - Representação de ONU XGPON no optisystem
Fonte: Autor.

Para simular as OLTs e a estrutura do site junto com suas atenuações, foi necessário adicionar componentes que fazem parte da estrutura dos equipamentos para fazer a sua simulação. Para a simulação dos transmissores das OLTs isso foi adicionado um bloco contendo um laser, gerador de pulso, junto ao modulador. A Figura 28 apresenta o modelo utilizado.

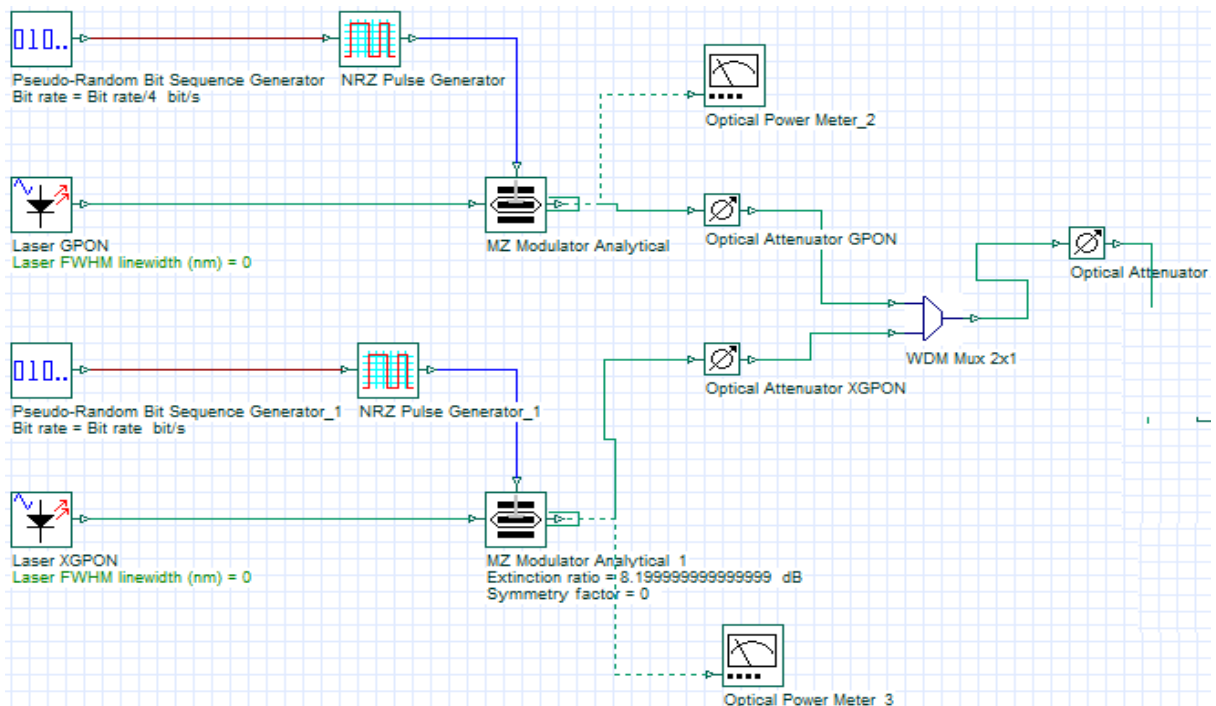


Figura 28 - Representação dos transmissores das OLTs no optisystem.
Fonte: Auto

Para simular os receptores das OLTs serão adicionados os componentes um receptor de sinal do tipo APD, um filtro, um regenerador de sinal e o dispositivo para fazer a medição da BER. A figura 29 apresenta o modelo utilizado no optisystem para simular os receptores das OLTs.

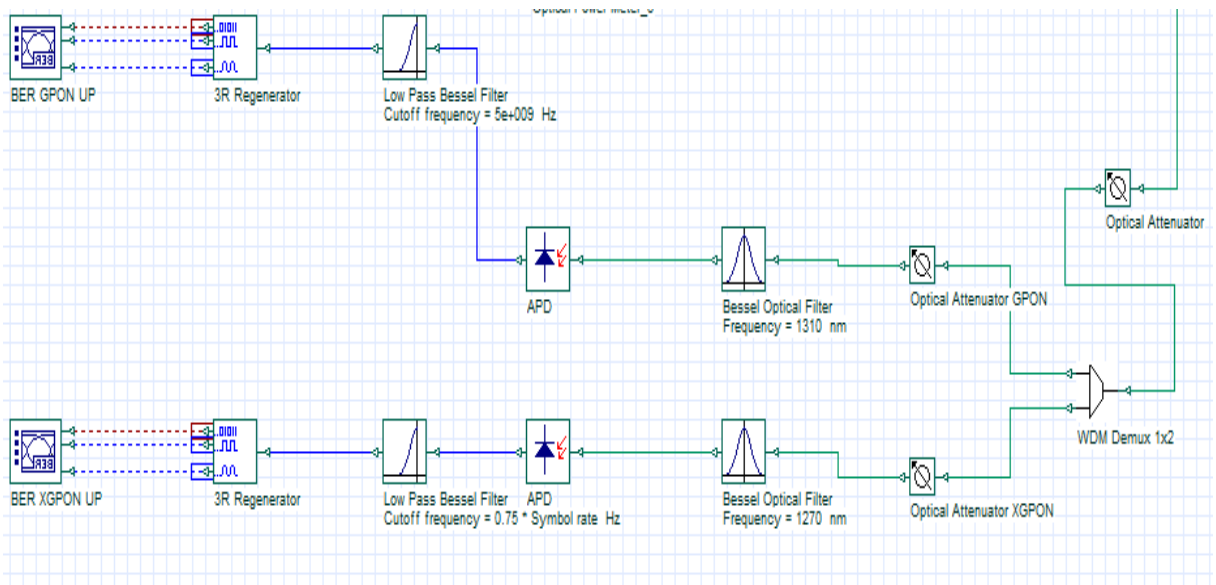


Figura 29 - Representação dos receptores da OLTs.
Fonte: Autor

Para a metodologia proposta são considerados dois cenários para fins de teste do projeto criado no Qgis. Em primeiro momento são obtidos os resultados da simulação de uma rede com distância máxima de 4,5 km, e com taxa de splitagem de 1:64 e posteriormente de 1:32. Em cada um dos casos são consideradas as perdas máximas para todos os dispositivos utilizados.

Em cada cenário os diagramas de olho para os sistemas GPON e XGPON no downstream e upstream são obtidos e comparados com as máscaras de cada tecnologia para validação do desempenho do sistema proposto. Os transmissores de downstream e upstream de ambos os sistemas permanecem ligados ao mesmo tempo durante todos os testes, de forma que os resultados obtidos se referem a uma rede óptica que possui as tecnologias GPON e XGPON operando simultaneamente.

4.6.1 Resultados da simulação da rede com split 1:32 e com distância máxima de atendimento de 4,5 km.

Primeiramente o projeto desenvolvido no software Qgis foi configurado para simulação no optisystem para uma rede que utiliza dois splitters (primeiro nível e segundo nível), no qual o primeiro spllter seria de 1:4 e o segundo de 1:8. Para a simulação em sua estrutura, e com equipamentos da Classe C+ para a tecnologia GPON, e Classe N2 para tecnologia XGPON. Conforme visto no projeto da rede, a distância máxima da rede óptica é de 4,5 km, e por meio das fórmulas de atenuação resultante para as duas tecnologias considerando utilizar o pior caso como exemplo, foi visto que a atenuação que o sinal sofre desde a OLT até a casa do cliente é de 26,54 dB, que corresponde à atenuação dos dois níveis de splitter, fusões e conector de campo. As Figuras 30 e 31 apresentam os diagramas de olho do sistema GPON para o downstream e upstream.

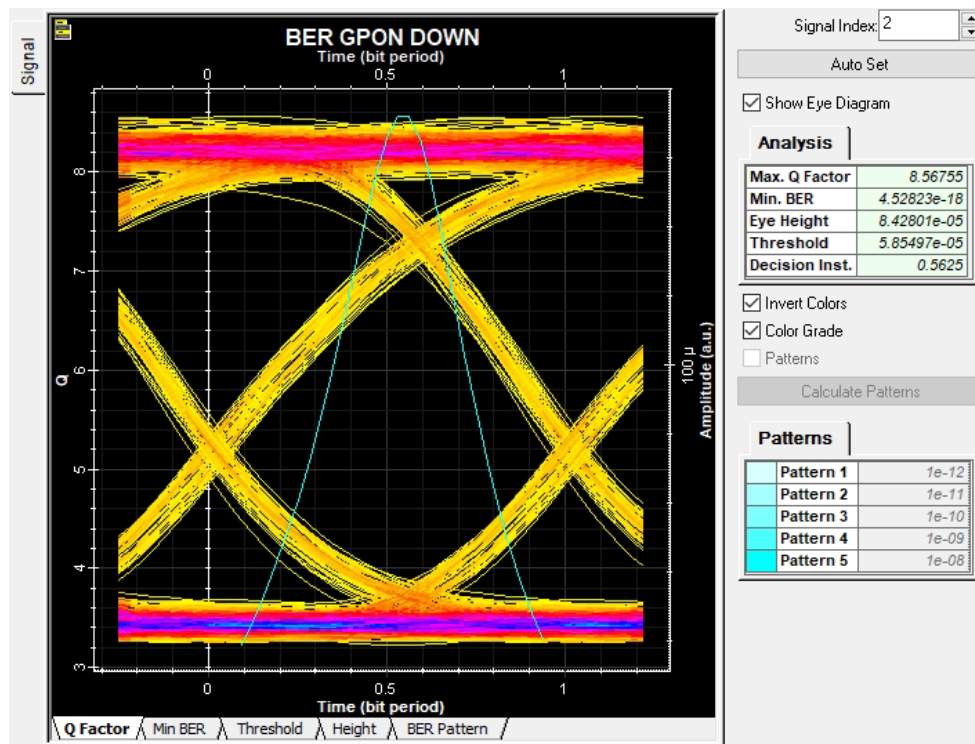


Figura 30 - Downstream GPON.
Fonte: Autor.

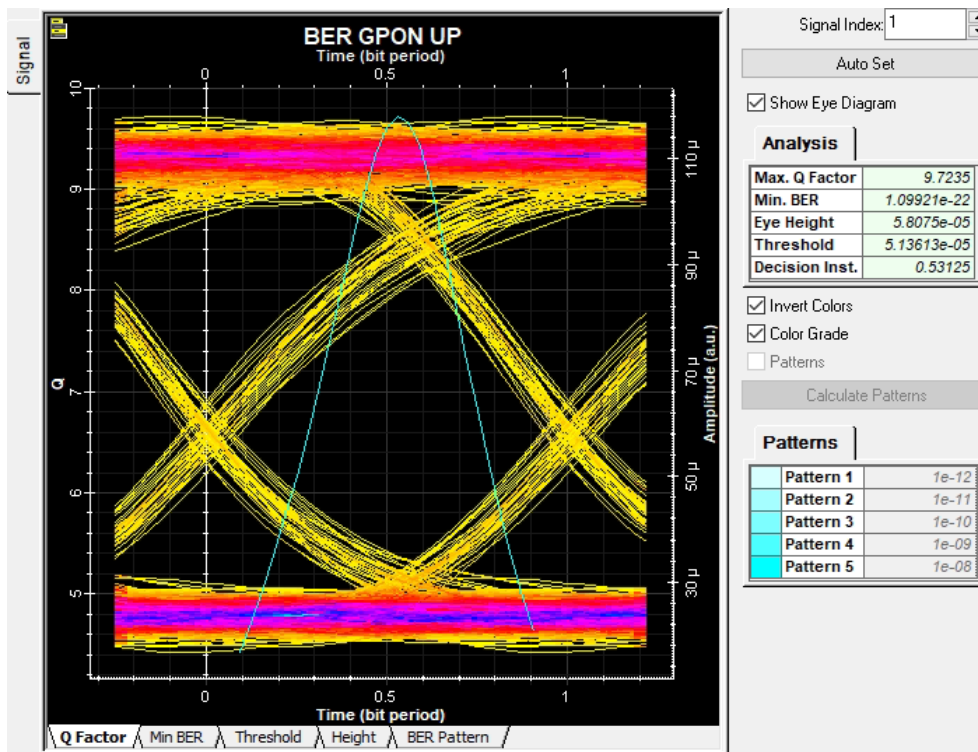


Figura 31 - Upstream GPON.
Fonte: Autor.

As Figuras 30 e 31 mostram os diagramas de olho do downstream e upstream dos sinais provenientes da tecnologia GPON, obtidos através da simulação da rede. Além disso, a máscara definida para o sistema também é apresentada, destacada na região central dos diagramas de olho (ITU-T, 2003). A máscara é uma faixa específica que representa os limites aceitáveis para a recepção do sinal, ou seja, a região em que os símbolos transmitidos podem ser detectados com confiabilidade.

Ao analisar os resultados obtidos, é possível verificar que os diagramas de olho atendem aos requisitos propostos para a tecnologia GPON em ambas as direções, ou seja, no sentido *downstream* e no sentido *upstream*. Isso significa que a transmissão e recepção dos sinais ópticos estão ocorrendo dentro dos padrões estabelecidos, e a forma dos diagramas de olho está dentro da máscara definida, garantindo que os símbolos sejam detectados de forma adequada. As Figuras 30 e 31 mostram o valor da BER coletada do sistema, e podemos observar que os valores obtidos são satisfatórios, com uma BER na ordem de 10^{-18} para o downstream, e 10^{-22} no upstream, ficando inferior à BER especificada para o sistema GPON, de 10^{-10} .

Com a simulação da rede podemos chegar à conclusão de que com esses parâmetros específicos a rede projetada irá atender todas as normas estabelecidas para o bom funcionamento da tecnologia GPON utilizando equipamentos da classe C+.

Da mesma forma que o GPON, foi analisada a simulação do sistema XG-PON utilizando as mesmas especificações, e com classe de equipamentos N2a. Os resultados obtidos na simulação da rede para o XGPON são apresentados nas Figuras 32 e 33.

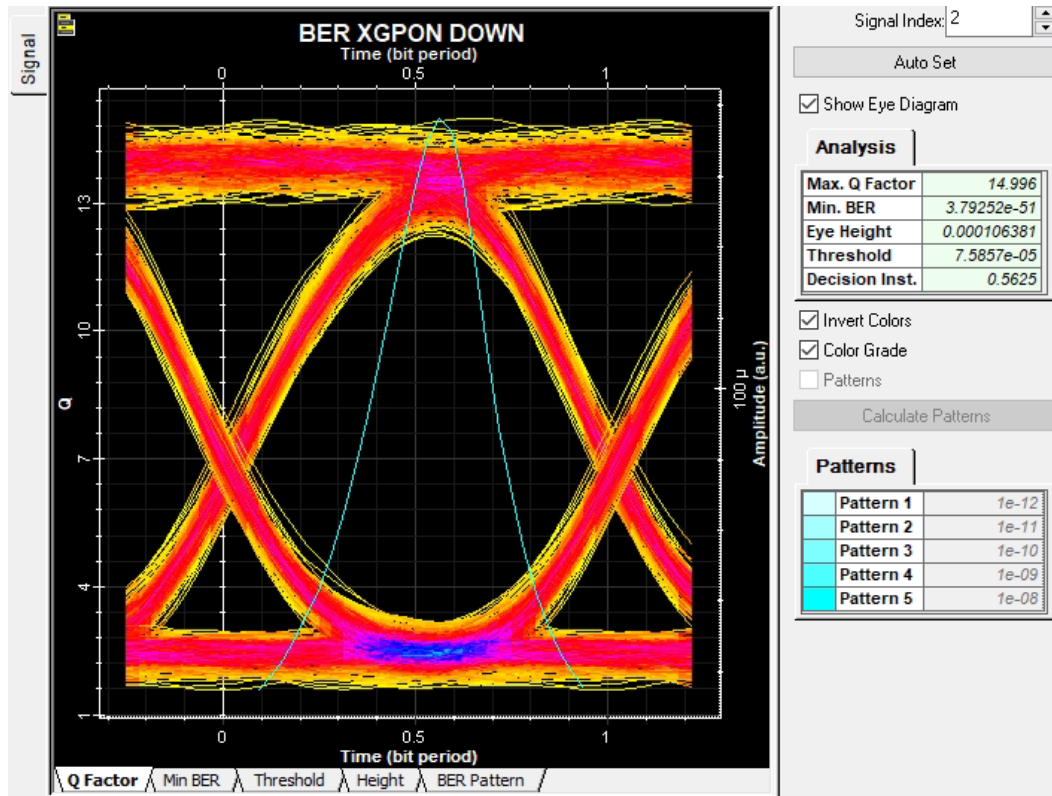


Figura 32 - Downstream XGPON.
Fonte: Autor.

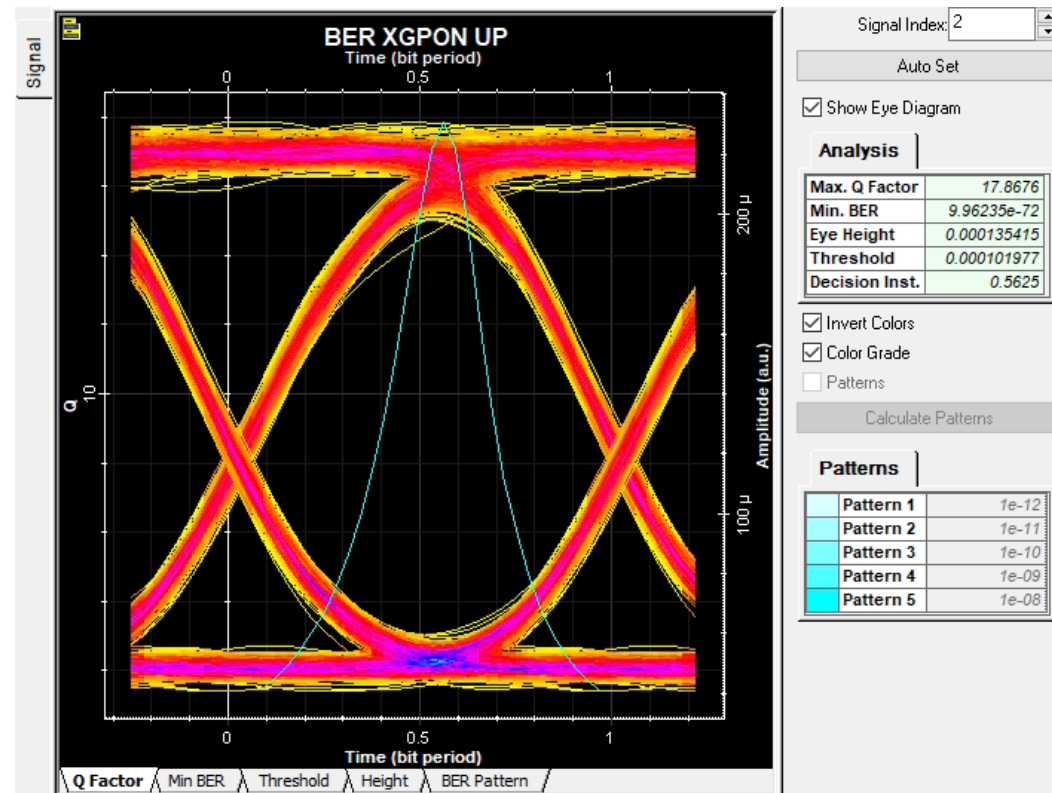


Figura 33 - Upstream XGPON.
Fonte: Autor.

De forma semelhante ao GPON, foram apresentados pelas Figuras 32 e 33 os resultados do diagrama de olho e da BER obtidos na simulação da rede óptica para a tecnologia XGPON, confirmando que a arquitetura construída atende os parâmetros necessários para a coexistência das tecnologias apresentadas, pois tanto no sentido downstream como no sentido upstream, foi verificado que o XGPON está funcionando com todos os requisitos já comentados neste trabalho para o seu funcionamento. Nas Figuras 32 e 33 é possível verificar a máscara e definida em (ITU-T, 2010) para a tecnologia XGPON.

Nos capítulos anteriores foi verificado através do cálculo do budget óptico, que a atenuação resultante da arquitetura proposta está dentro dos limites para o bom funcionamento das duas tecnologias. Logo o projeto da rede construído dentro do software Qgis está totalmente válido para a construção, pois através da simulação, foi constatado que a arquitetura projetada atende aos requisitos de atenuação, BER e diagrama de olho nas duas tecnologias, com um alcance máximo de 4,5 km, e uma taxa de splitagem de 1:64.

4.6.2 Resultados da simulação da rede com split 1:32 e com distância máxima de atendimento de 9 km.

Para o segundo cenário serão consideradas as mesmas especificações de splitagem que foram utilizadas no teste anterior, somente com uma alteração na distância máxima que a rede pode suportar. Esse teste é importante pois podemos conhecer os limites com que a topologia construída consegue alcançar com a coexistência de duas tecnologias. Nesse teste foi utilizado o dobro da maior distância entre a caixa de atendimento e o transmissor conhecidos no projeto construído no Qgis. Como foi visto nos capítulos anteriores essa distância máxima é de 4,5 km, então para esse teste será considerada a distância da fibra óptica de 9km. As Figuras 34 e 35 apresentam os resultados da simulação no optisystem para a tecnologia GPON.

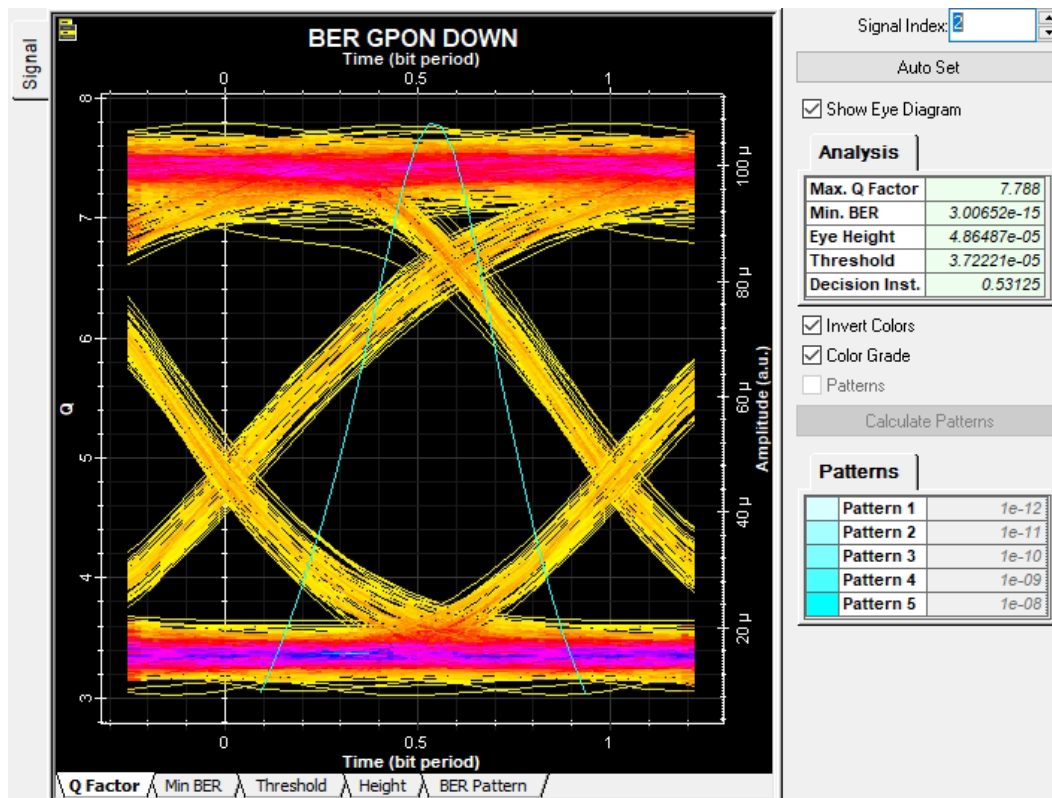


Figura 34 - Downstream GPON.
Fonte: Autor.

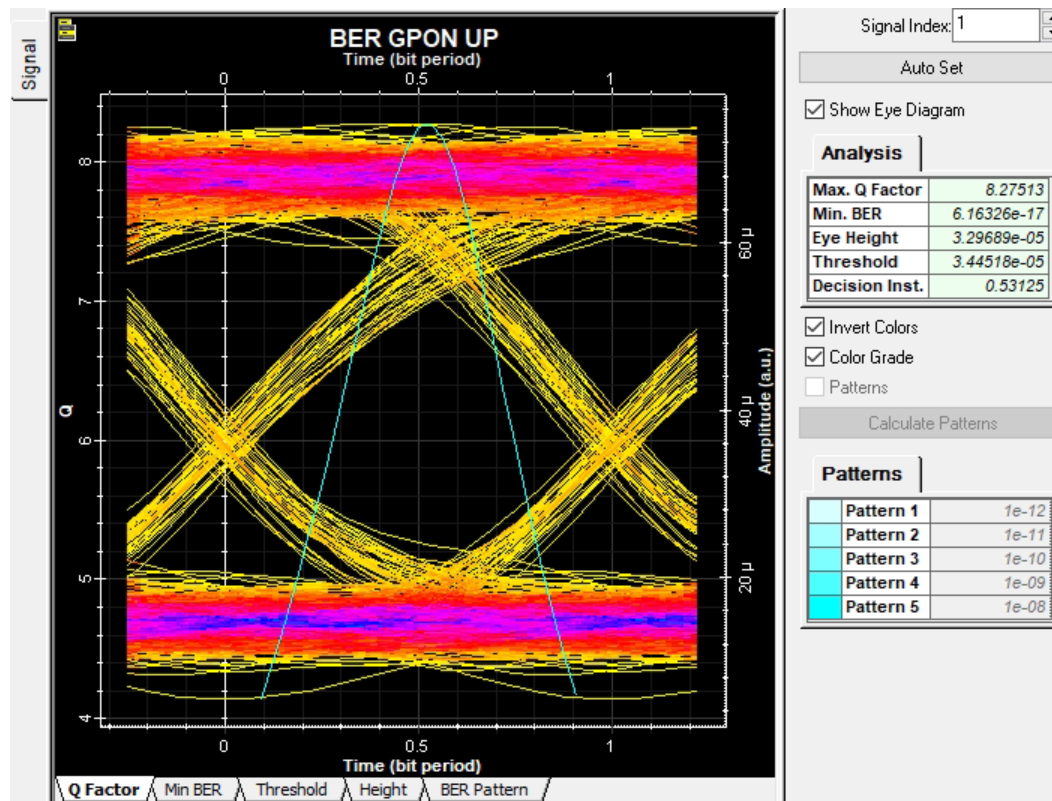


Figura 35 - Upstream GPON.
Fonte: Autor.

A figuras 34 e 35 apresenta o diagrama de olho do downstream e upstream dos sinais provenientes do GPON obtidos na simulação da rede, mas agora com a taxa de splitagem de 1:32 e uma distância de 9 km. Observando os resultados obtidos nesse segundo cenário, é possível verificar por meio do diagrama de olho que mesmo dobrando a distância, os requisitos necessários para o bom funcionamento a tecnologia GPON estão sendo atendidos em ambas as direções. As figuras mostram ainda o valor da BER coletada do sistema, e podemos observar que os valores obtidos são satisfatórios, com uma BER na ordem de 10^{-15} para o downstream, e 10^{-17} no upstream, ficando inferior à BER especificada para o sistema GPON, de 10^{-10} .

Para se utilizar a coexistência com a distância de 9 km é necessário verificar como vai se comportar a BER e o diagrama de olho no XGPON. As figuras 36 e 37 apresentam os resultados da simulação no optisystem mantendo todas as especificações utilizadas na tecnologia GPON, e ao se analisar os resultados é visto que mesmo se dobrando a distância máxima, as especificações necessárias para o bom funcionamento do XGPON continuam sendo respeitadas.

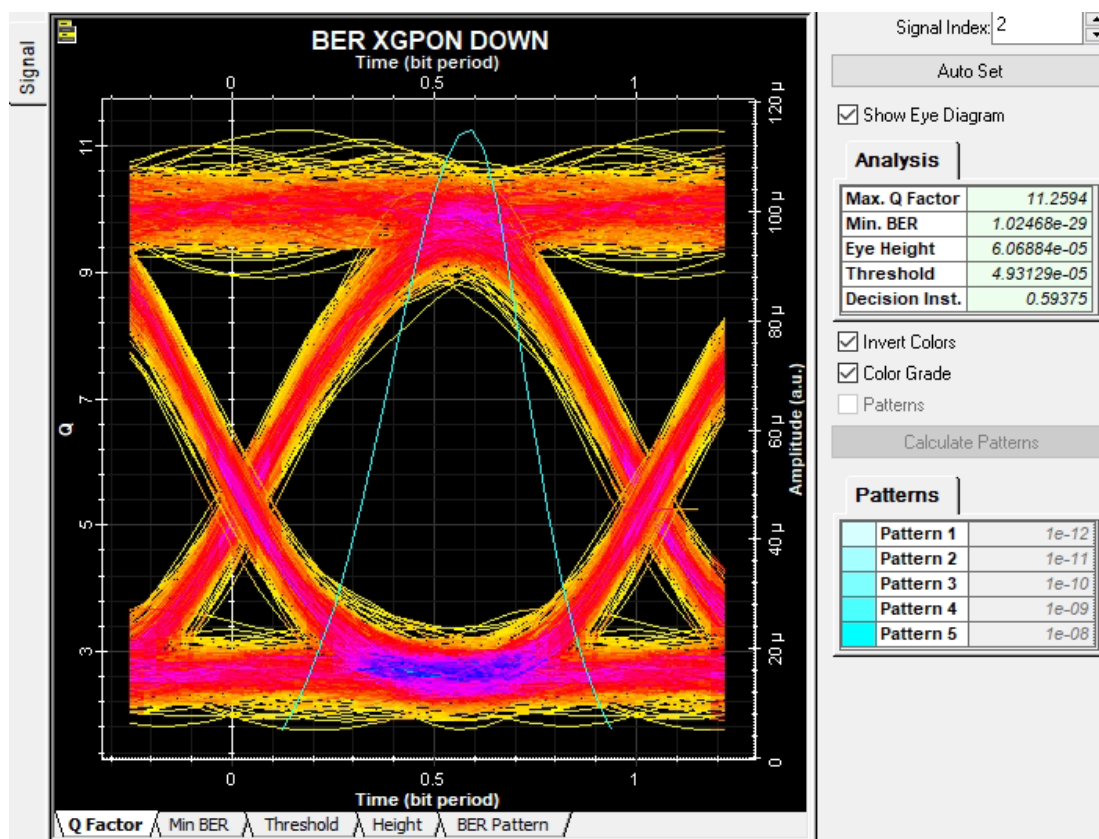


Figura 36 - Downstream XGPON.

Fonte: Autor.

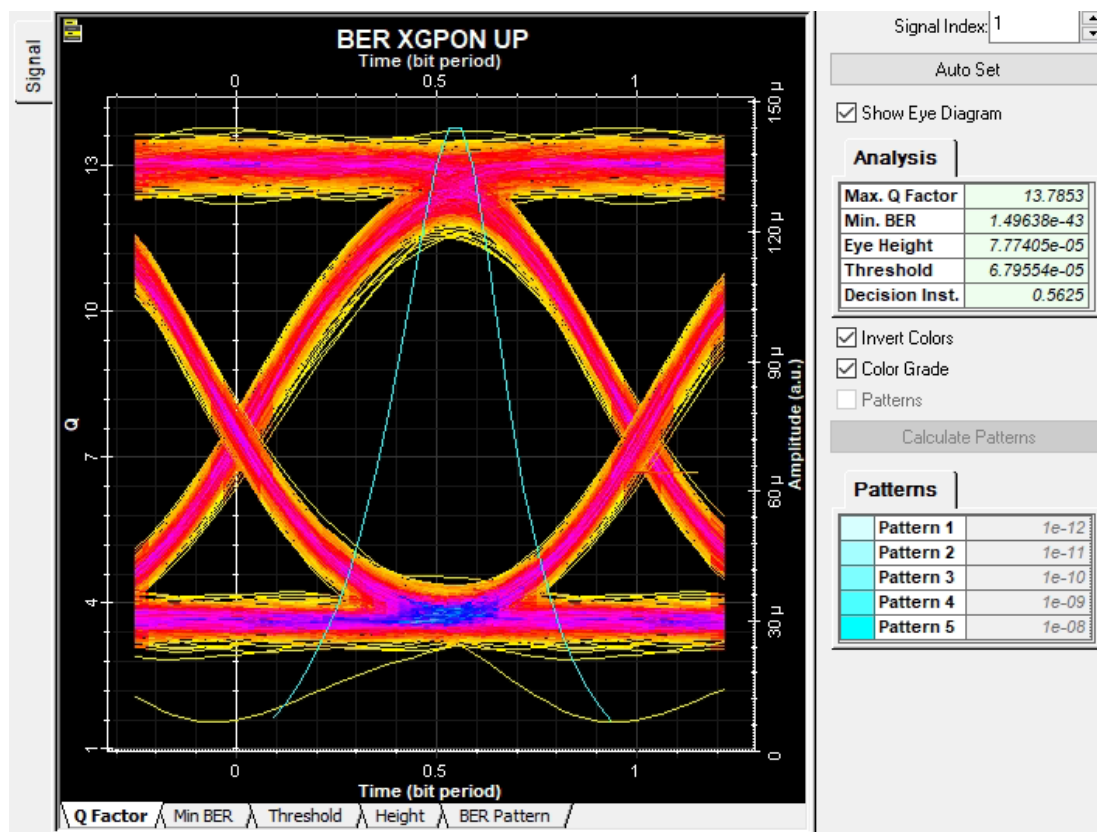


Figura 37 - Upstream XGPON.
Fonte: Autor.

Analisando os resultados da simulação da rede XGPON podemos observar que a BER está dentro do limite para o bom funcionamento da tecnologia, com a ordem de 10^{-29} para o downstream e 10^{-43} para o upstream. Logo podemos concluir que o projeto construído no Qgis está apto a comportar a coexistência das duas tecnologias com uma razão de 1:32, a uma distância máxima de até 9 km, já que as duas tecnologias estão funcionando seguindo todas as especificações ITU. É importante a comprovação do funcionamento a 9 km pois é normal que apareçam clientes mais distantes para o atendimento, e com a capacidade do projeto de alcançar esses locais não será necessário maiores investimentos na infraestrutura.

4.6.3 Resultados da simulação da rede com split 1:64 e com distância máxima de atendimento de 4,5 km.

No terceiro cenário, estamos considerando uma distância máxima de 4,5 km a partir do projeto elaborado no QGIS, porém com algumas alterações na taxa de splitagem. A fim de tornar o projeto mais econômico, avaliamos se a rede poderia

suportar mais clientes por porta PON. Nas configurações anteriores, a rede era capaz de atender apenas até 32 clientes por porta PON. Nessa nova configuração, a capacidade da rede foi ampliada para atender até 64 clientes por porta PON.

Para as simulações, modificamos o splitter de primeiro nível para 1:8, o que resultou em um aumento na atenuação total do projeto, que passou a ser de 26,22 dB para a tecnologia GPON e 26,28 dB para a XGPON. As figuras 38 e 39 apresentam o diagrama de olho e a BER no sentido downstream e upstream do GPON.

Essas alterações visam otimizar o projeto, permitindo uma maior capacidade de atendimento de clientes por porta PON e garantindo que a rede seja capaz de lidar com a demanda crescente de usuários, mantendo ao mesmo tempo uma eficiência energética e econômica. A análise do diagrama de olho e da BER nos fornece informações cruciais sobre a qualidade e a integridade do sinal óptico transmitido, auxiliando na avaliação e no aprimoramento contínuo do sistema de comunicação óptica.

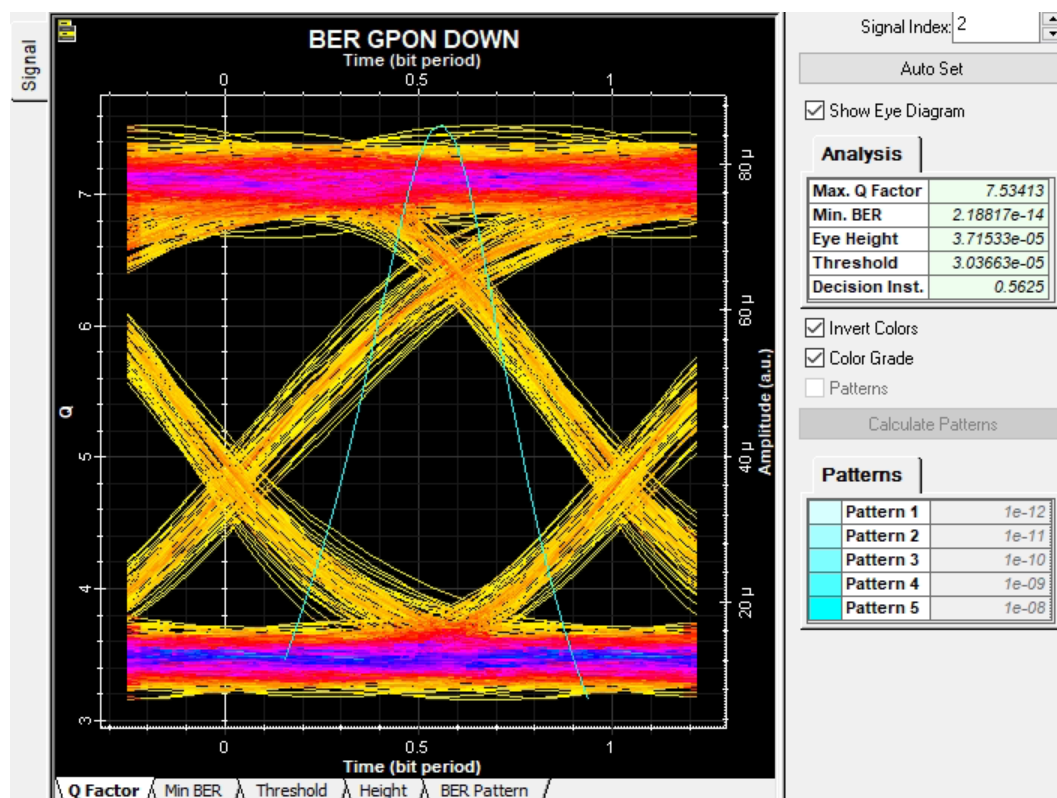


Figura 38 - Downstream GPON.

Fonte: Autor.

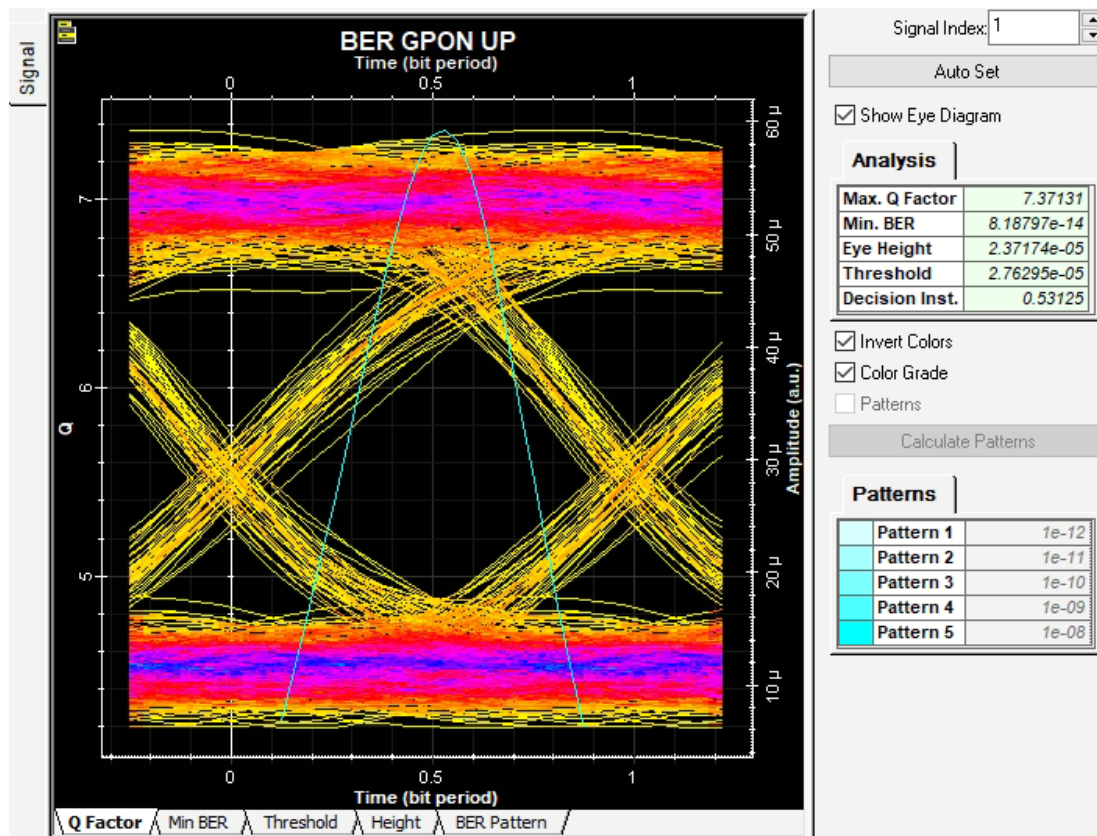


Figura 39 - Upstream GPON.
Fonte: Autor.

Nesse terceiro cenário é verificado que mesmo com alterações na taxa de splitagem, o GPON segue respeitando os requisitos suficientes para que haja uma boa transmissão, pois nas imagens podemos verificar que a BER e o diagrama de olho estão dentro do normal para que haja uma transmissão sem interrupções. No downstream a BER ficou na ordem de 10^{-14} e no upstream 10^{-14} , ficando acima do valor indicado de 10^{-10} .

Para a comprovação do funcionamento da coexistência da rede foram feitos os mesmos teste com a tecnologia XGPON, utilizando a taxa de splitagem de 1:8 no splitter de primeiro nível e de segundo nível, o que permite a rede atender até 64 clientes por porta PON na tecnologia. As figuras 40 e 41 apresentam o resultado da simulação.

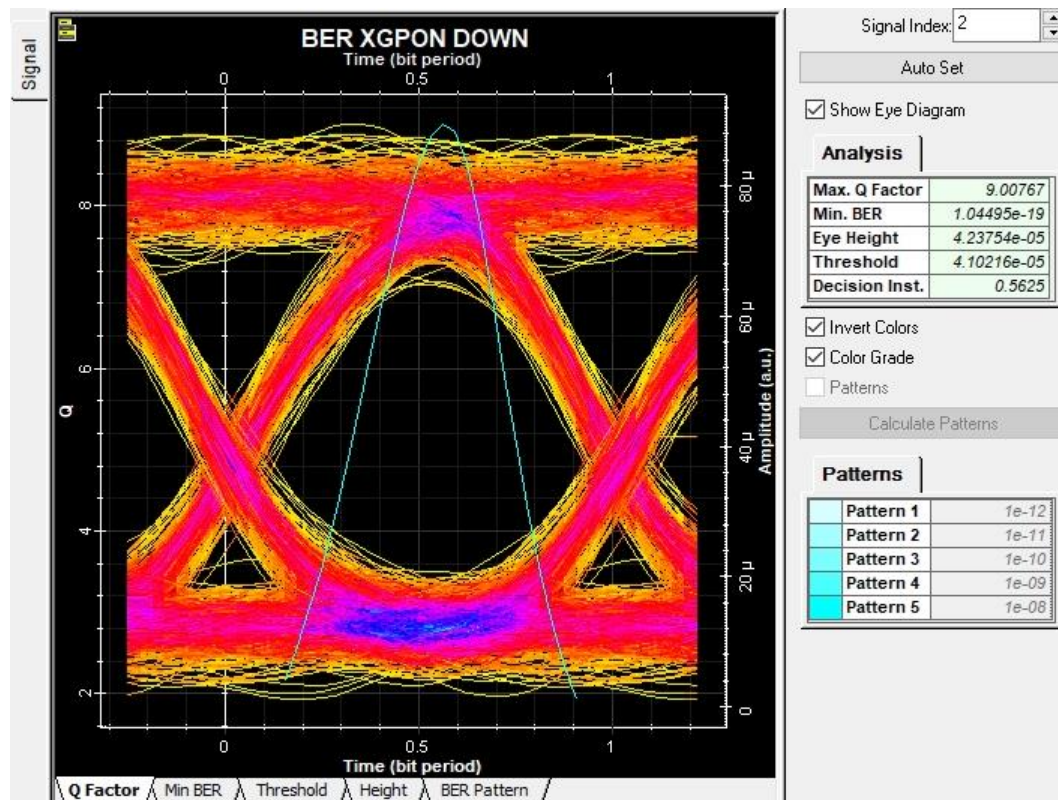


Figura 40 - Downstream XPON.
Fonte: Autor.

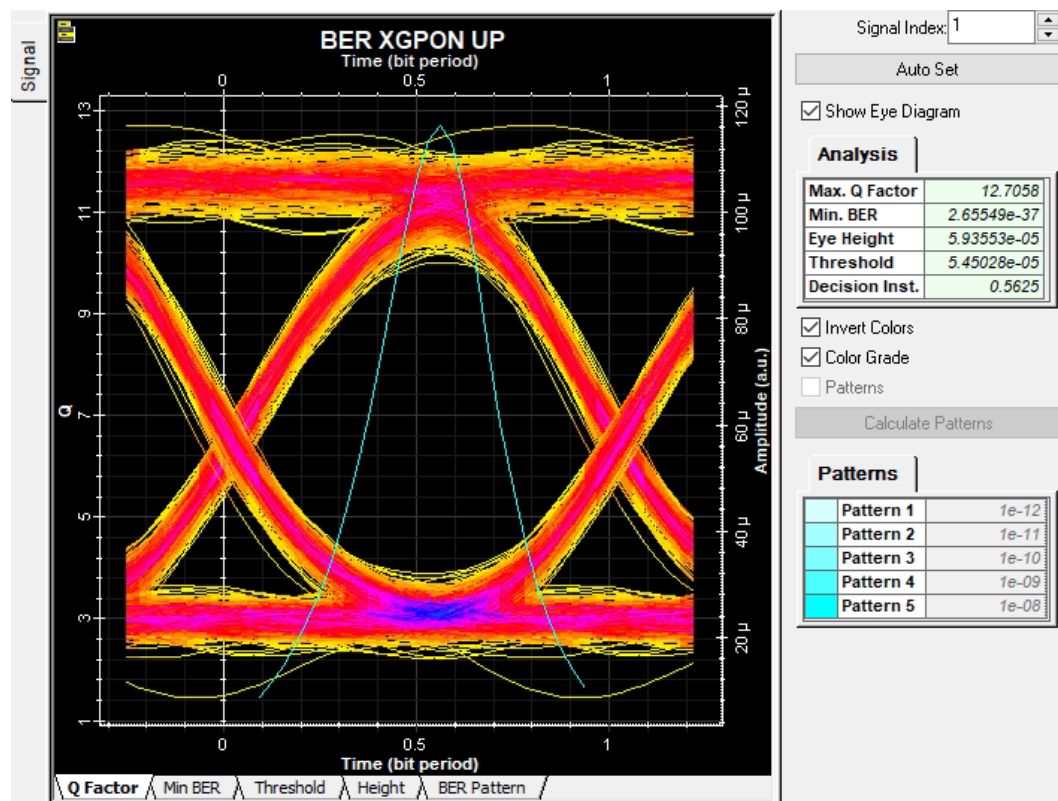


Figura 41 - Upstream XGPON.
Fonte: Autor.

A partir da análise das figuras do diagrama de olho e da BER da tecnologia XGPON, podemos concluir que para o projeto construído é permitido a coexistência entre as tecnologias nessa configuração com a taxa de splitagem de 1:64 e distância máxima de 4,5 km. No downstream a BER ficou na razão de 10^{-19} e no upstream de 10^{-37} , ficando bem distante do mínimo recomendado para se haver uma transmissão sem interrupções.

4.6.4 Resultados da simulação da rede com split 1:64 e com distância máxima de atendimento de 9 km.

Nesse quarto cenário foram analisados os resultados das simulações das tecnologias com alterações na taxa de splitagem e na distância. Para essa simulação foi verificado se seria possível atender até 64 clientes por porta PON, com uma distância de até 9 km. Como no terceiro cenário, foi utilizado um splitter de 1:8 no primeiro nível para assim conectar até 8 CTOs com capacidade de atender até 8 clientes cada uma. As figuras 42 e 43 apresentam os resultados da simulação para o GPON no sentido downstream e upstream.

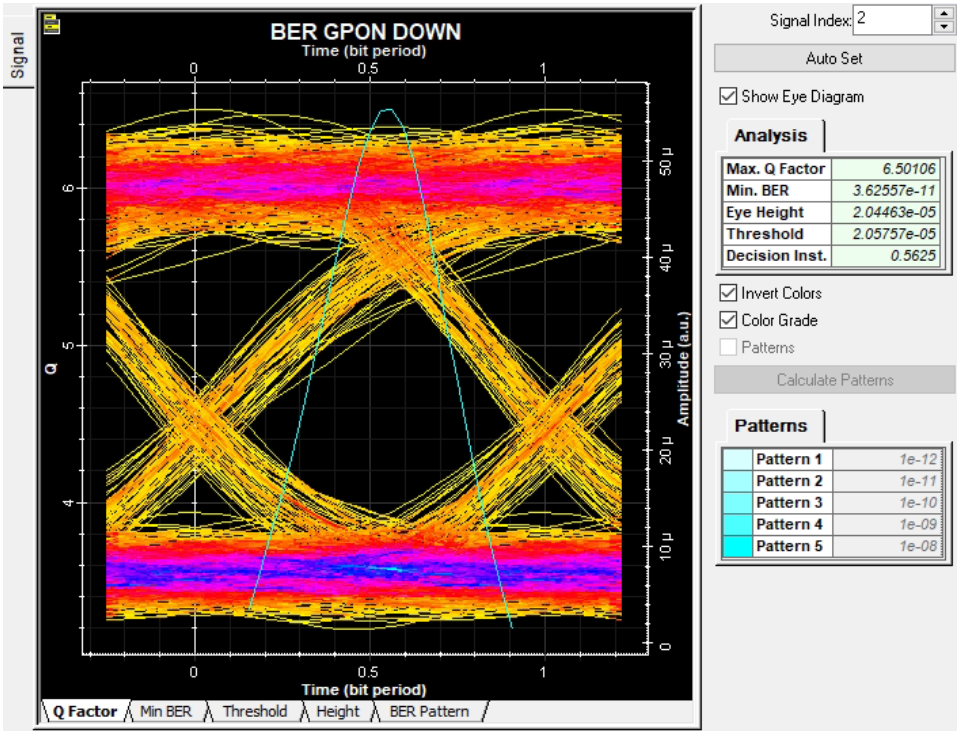


Figura 42: Downstream GPON.
Fonte: Autor.

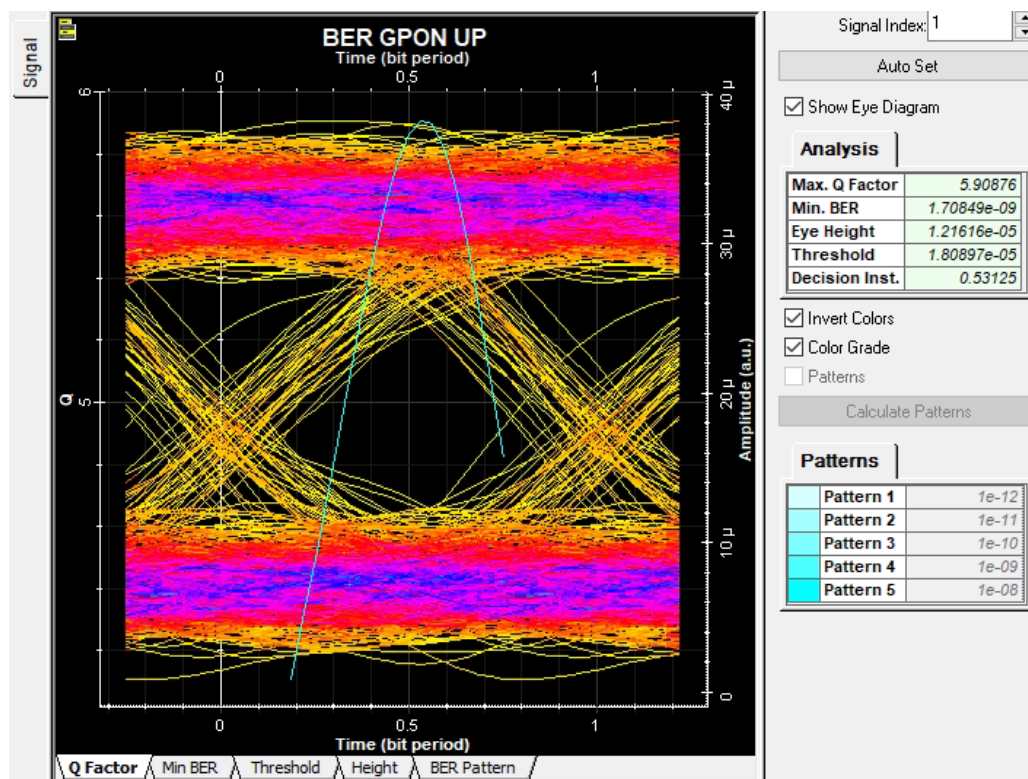


Figura 43 - Upstream GPON.

Fonte: Autor.

Observando os resultados da simulação temos as figuras do diagrama de olho e os valores da BER. No downstream a BER ficou na base de 10^{-11} e no upstream ficou na base de 10^{-9} . Logo o upstream do GPON ultrapassa o valor recomendado de 10^{-10} para a tecnologia, não sendo viável a sua aplicação. Como a BER do upstream ficou bem próxima da recomendada para o GPON, podemos considerar que ao se utilizar distâncias aproximadamente 1 km de diferença do que foi utilizado na simulação, podemos utilizar essa configuração para a aplicação com o GPON, pois ele ficará com a BER dentro dos padrões necessários para que não haja perda na informação transmitida. No próximo tópico serão realizados testes para a comprovação.

Nesse quarto cenário também foram feitas simulações com a tecnologia XGPON utilizando as mesmas especificações utilizadas anteriormente no GPON. Apesar do GPON não ter sido eficiente utilizando razão de 64 e distância máxima de 9 km, é importante que sejam feitas as simulações para verificar como o XGPON se comporta nessa arquitetura com essas especificações. As figuras 44 e 45 apresentam os resultados para o XGPON.

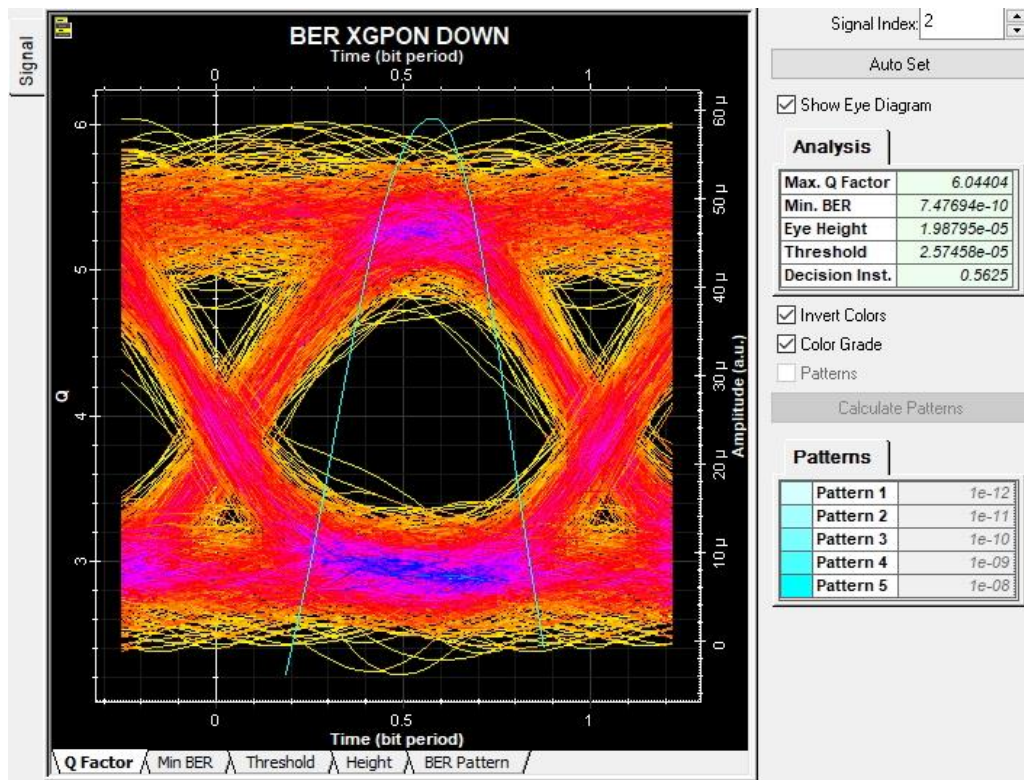


Figura 44 - Downstream XGPON.
Fonte: Autor.

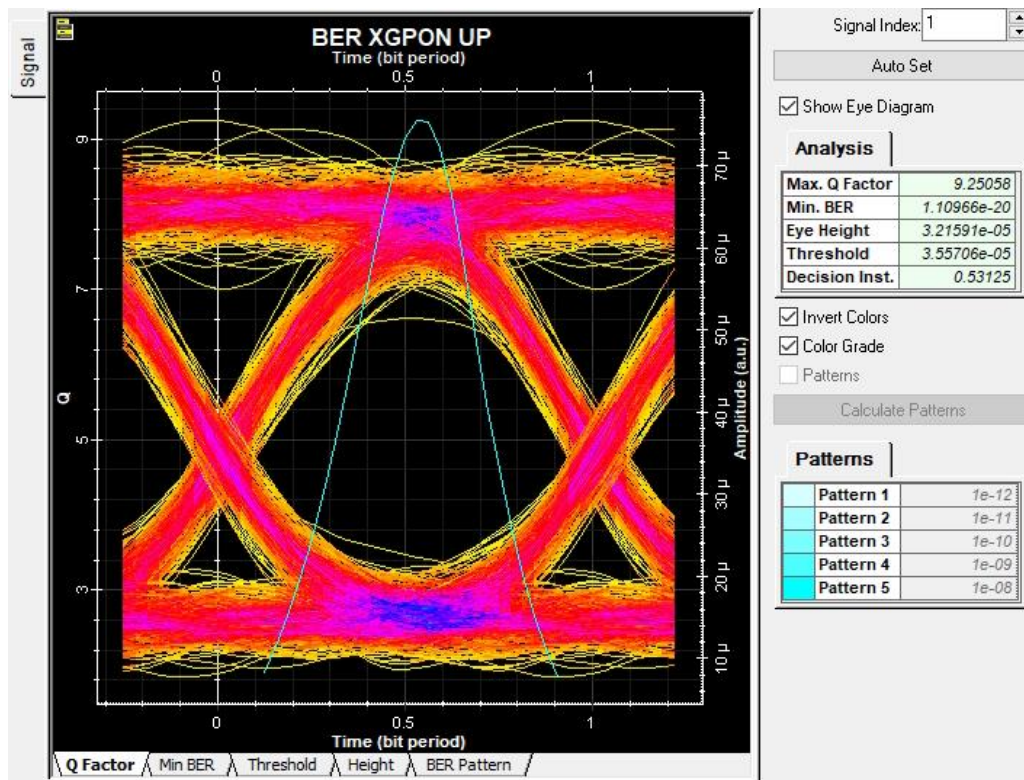


Figura 45 - Upstream XGPON.
Fonte: Autor.

Analisando os resultados do diagrama de olho e da BER, verificamos que no sentido downstream a BER ficou na razão de 10^{-10} , e no sentido upstream ficou na razão de 10^{-20} . Isso demonstra que apesar do GPON não está respeitando o limite da BER para que não haja perda considerada de informação na transmissão, o XGPON irá conseguir suportar caso haja necessidade de utilizar as especificações impostas nesse tópico, podendo ser utilizado para atender clientes a uma distância maior, ou até mesmo em casos de ser necessário expandir a rede.

4.6.5 Teste de simulação de rede com splitter de 1:64 e com distância máxima de até 8km.

No tópico anterior, foram realizados experimentos para avaliar a eficiência da tecnologia GPON em diferentes configurações de splittagem e distâncias de transmissão. Descobriu-se que ao utilizar uma configuração de splittagem de 1:64 e uma distância de transmissão de 9 km, não foi possível alcançar a BER necessária para garantir um funcionamento ideal do sistema.

Com o objetivo de otimizar o aproveitamento da infraestrutura e determinar a distância mais adequada para o GPON, foram realizados testes adicionais, desta vez com uma distância máxima reduzida para 8 km. O foco principal desses testes era assegurar que os parâmetros obtidos estivessem dentro dos limites requeridos para uma transmissão eficiente e confiável. Os resultados desses testes estão apresentados nas figuras 46 e 47, que exibem os dados relacionados à BER para a tecnologia GPON.

Essas informações são de suma importância, pois uma BER adequada é essencial para prevenir erros na transmissão de dados, garantindo uma experiência de alta qualidade para os usuários finais. A análise dos resultados permite ajustar e otimizar a infraestrutura de rede, garantindo que ela seja capaz de lidar com as demandas de transmissão de dados de forma eficaz e confiável, mantendo assim a qualidade do serviço oferecido aos usuários.

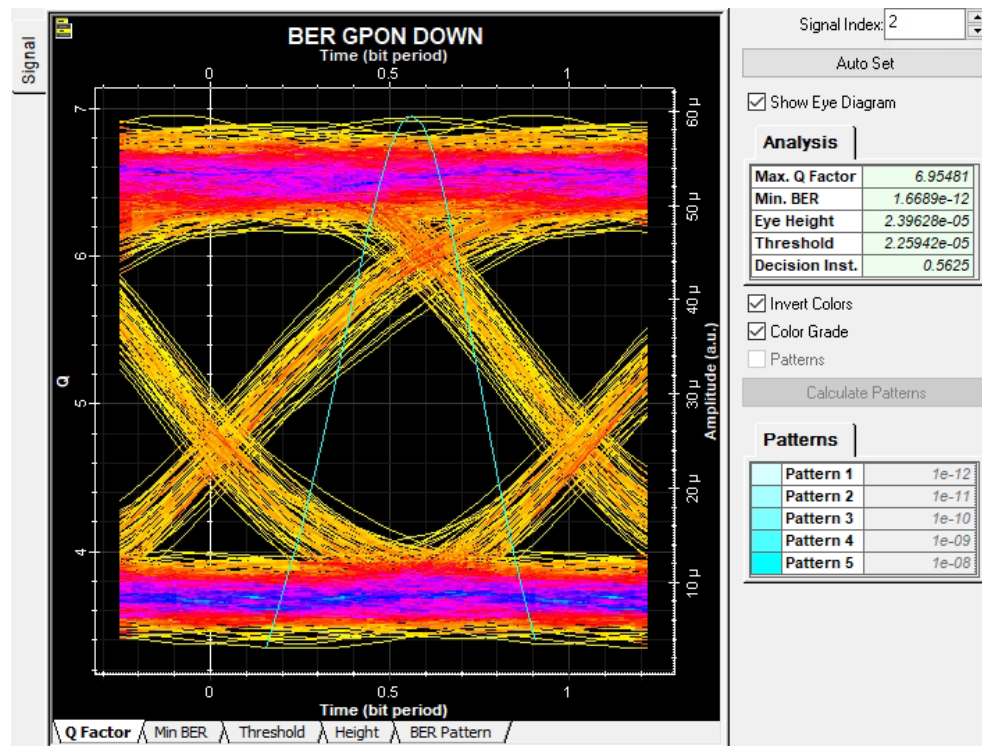


Figura 46: Downstream GPON.
Fonte: Autor.

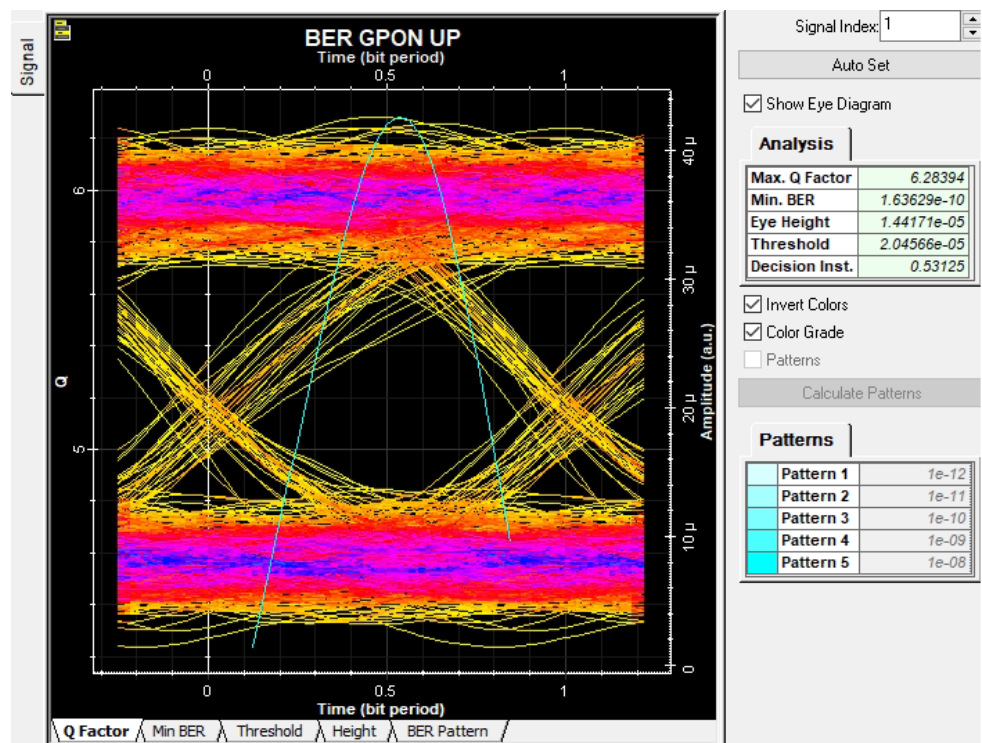


Figura 47 - Upstream GPON.
Fonte: Autor.

Após uma análise detalhada dos resultados obtidos através da simulação, ficou evidente que a redução da distância de transmissão de 9 para 8 quilômetros teve um impacto positivo no desempenho da tecnologia GPON, especialmente no canal upstream. Ao adotar a configuração de splittagem de 1:64, foram alcançados resultados notáveis na taxa de erro de bits. No canal downstream, a BER atingiu uma razão de 10^{-12} , demonstrando uma transmissão confiável e uma qualidade de serviço excepcional. Já no canal upstream, embora a BER tenha sido ligeiramente mais alta, alcançou um valor muito satisfatório de 10^{-10} , o que ainda está dentro dos padrões aceitáveis para garantir o bom funcionamento da tecnologia GPON. Esses testes também foram realizados para a tecnologia XGPON, e as figuras 48 e 49 apresentam os resultados.

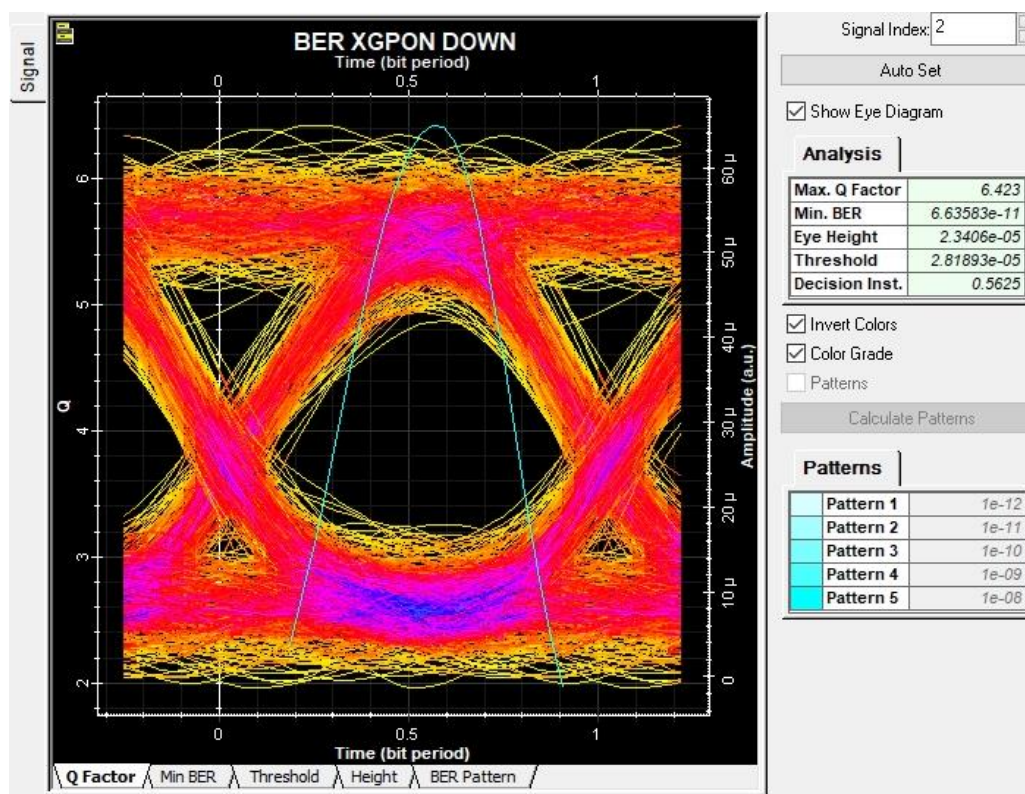


Figura 48 - Downstream XGPON.
Fonte: Autor.

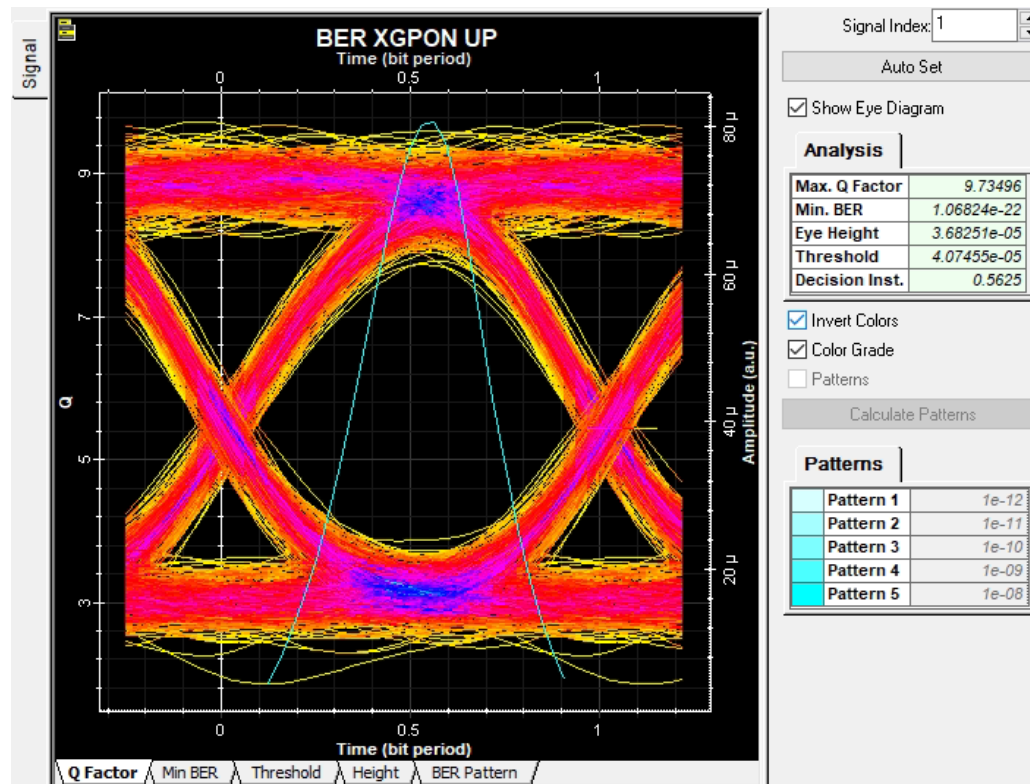


Figura 49 - Upstream XGPON.
Fonte: Autor.

Após a análise dos testes da tecnologia XGPON no tópico anterior, constatou-se que já com a distância de 9km ela já atendia à BER necessária para o seu funcionamento adequado. No entanto, buscando sempre otimizar o desempenho da rede, foram conduzidos novos testes com uma distância de transmissão menor de 8km. Esses testes revelaram melhorias significativas na BER tanto no canal downstream quanto no upstream. No canal downstream, os resultados impressionantes alcançaram uma taxa de erro de bits de 10^{-11} , o que representa uma transmissão altamente confiável e praticamente livre de erros. Já no canal upstream, os resultados foram ainda mais surpreendentes, com uma notável taxa de 10^{-22} , indicando uma capacidade excepcional de lidar com a transmissão de dados no sentido contrário. Essas descobertas são extremamente promissoras, pois mostram que a tecnologia XGPON pode ser ainda mais aprimorada ao reduzir a distância de transmissão. Essa abordagem possibilita que a infraestrutura de comunicação alcance

um novo patamar de eficiência e confiabilidade, atendendo às crescentes demandas dos usuários por uma experiência de internet rápida e estável.

4.7 Arquitetura consolidada

Após analisarmos os resultados obtidos por meio do cálculo da atenuação, dos dados do projeto no QGIS e das simulações realizadas no OptiSystem, alcançamos o objetivo deste trabalho, que era projetar uma rede capaz de suportar a coexistência entre as tecnologias GPON e XGPON. Com base nos dados coletados, pudemos compreender os limites de cada tecnologia dentro da arquitetura construída neste estudo, permitindo-nos analisar os parâmetros que a rede deveria obedecer para obter o máximo aproveitamento da infraestrutura. Os resultados comprovaram que o projeto desenvolvido no QGIS viabilizaria a implantação simultânea das duas tecnologias, e sua capacidade de operarem conjuntamente proporcionam uma solução eficiente para atender às demandas de transmissão de dados e oferecer serviços de internet de alta qualidade aos usuários finais.

Com os dados obtidos no Qgis e no optisystem foi permitido verificar como iria se comportar as duas tecnologias quando mudados o alcance máximo suportado, e a taxa de split, oferecendo ao projetista moldar a rede óptica de acordo com o cenário que ele deseja atender. A Figura 46 apresenta a arquitetura da rede para uma taxa de split de 1:64 com base nos resultados obtidos através das simulações. A partir da figura é possível analisar os critérios de projeto que precisam ser considerados para possibilitar a construção de uma planta óptica que suportará a tecnologia GPON e XGPON.

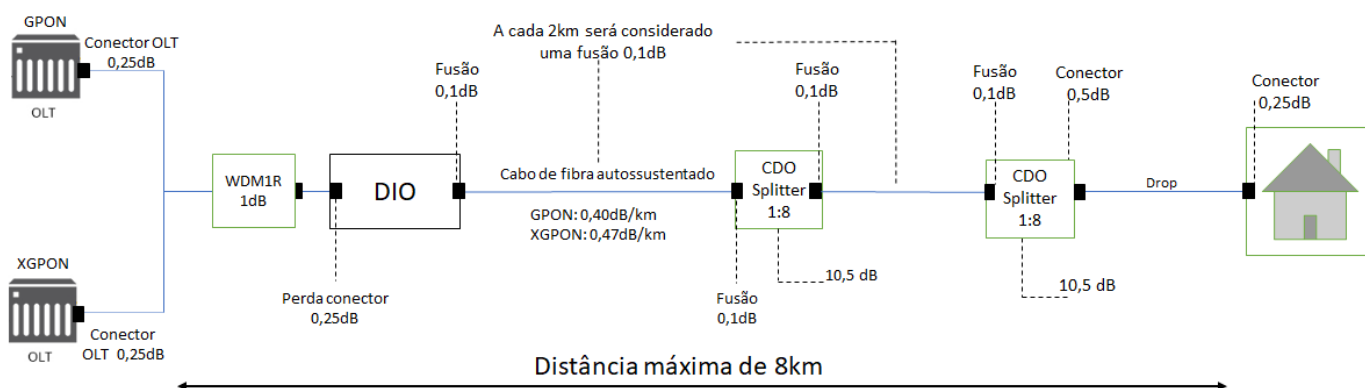


Figura 50 - Arquitetura consolidada.

Fonte: Autor.

As recomendações das tecnologias PON abordadas neste estudo especificam um alcance máximo da rede óptica de acesso de 20 km, conforme definido pelas diretrizes do ITU-T em 2010. No entanto, durante a análise dos cenários apresentados neste trabalho e com base nos dados obtidos do software de construção e simulação da rede, ficou evidente que as perdas introduzidas por elementos da rede, como DIO, splitters, fusões, conectores e pelo filtro WDM1r (Wavelength Division Multiplexer 1R), inviabilizam o atendimento desse alcance estabelecido. Todos esses elementos citados causam atenuações na rede, comprometendo significativamente a potência do sinal óptico e limitando a extensão total da rede. A definição do alcance máximo da rede é uma etapa crítica e fundamental em um projeto de fibra óptica, uma vez que influencia diretamente a viabilidade e o desempenho da infraestrutura de comunicação.

Diante dessas limitações identificadas, torna-se imprescindível encontrar soluções adequadas para mitigar as perdas e garantir que o alcance necessário seja alcançado. Logo a rede construída nesse projeto procurou a melhor otimização do *layout* afim de utilizar componentes de alta qualidade, aplicando estratégias para minimizar as atenuações, e sempre trabalhando com a possibilidade em aplicações reais.

Um projeto de fibra óptica bem-sucedido requer uma análise detalhada dos elementos da rede e das condições específicas de cada cenário, a fim de garantir que o alcance máximo estabelecido pelas tecnologias PON seja atendido, assegurando uma transmissão óptica confiável e eficiente ao longo de toda a rede. Essa abordagem garantirá a entrega de serviços de alta qualidade aos usuários finais e a plena utilização do potencial das tecnologias PON.

No trabalho “*Analysis of Coexisting GPON and NG-PON1 (10GPON) Systems*” (Mraković, 2011) um teste semelhante foi realizado com o apoio do mesmo software de simulação utilizado neste trabalho. O alcance de 20 km especificado pela tecnologia GPON foi obtido, mas nesses testes as perdas devido a conexões, fusões e equipamentos nas foram consideradas. Logo esse trabalho não se preocupou em aplicar seus resultados em um ambiente real, sendo inviável aplicação para provedores de internet.

Com os resultados das simulações podemos concluir que para uma situação em que se há o objetivo de atender uma região com tecnologia GPON e XGPON, a

maior taxa de splitagem seria na razão de 1:64, pois de acordo com os resultados vimos que se o provedor deseja seguir as normas determinadas para o bom funcionamento das tecnologia, ele não deve aumentar a atenuação da sua rede. Logo, essa taxa de splitagem irá permitir que os provedores consigam atender a uma distância razoável utilizando os equipamentos abordados neste trabalho. Porém, caso haja a necessidade de alcançar maiores distâncias, será necessário utilizar uma taxa de splitagem menor, sendo a mais indicada a de 1:32, pois irá diminuir a atenuação da rede e consequentemente irá permitir que o sinal de luz proveniente dos transmissores de cada tecnologia a alcançar maiores distâncias.

Caso um provedor deseje inicialmente utilizar somente a tecnologia GPON e só depois adicionar a XGPON, é recomendado que sejam utilizados os equipamentos da Classe C+, pois futuramente quando adotada a coexistência das tecnologia, não será necessário serem trocadas as ONUs de cada cliente já instalado com GPON, o que irá preservar o investimento inicial na rede. Será necessário também utilizar ONUs e OLTs que possuam filtro WDM interno para que não haja interferen, é importante que as OLTs e ONTs GPON sejam equipadas com o filtro WDM interno e que este filtro permita apenas a passagem das bandas de downstream e upstream do GPON.

Nas simulações realizadas pelo software de simulação de redes ópticas Optisystem, foi verificado que os parâmetros de desempenho dos sistemas GPON e XGPON são atendidos para a rede proposta com taxa de split de 1:64 e 1:32, sendo considerados no projeto da rede equipamentos GPON C+ e XGPON N2.

5 CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho para a criação de um modelo de projeto que permita a coexistência das redes GPON e XGPON em uma mesma estrutura óptica estar atendendo todos os requisitos necessários para que haja o bom funcionamento das tecnologias. A arquitetura construída apresenta um modelo que está permitindo a coexistência das tecnologias XGPON e GPON em uma mesma planta óptica, o que traz a possibilidade de preservar todo o dinheiro gasto em infraestrutura e equipamentos. Essa possibilidade vem como uma solução para provedores de internet que não possuem bastante recursos financeiros para migrarem clientes para novas tecnologias.

A rede proposta neste projeto apresenta semelhanças significativas com os modelos atualmente utilizados para atender clientes residenciais. Essa característica é de grande vantagem, pois permite sua implantação sem a necessidade de mudanças drásticas na infraestrutura das redes já existentes. Uma das considerações importantes durante o desenvolvimento do projeto foi o uso de splitters conectorizados para a conexão dos clientes, visando garantir que a implementação não se distanciasse muito da realidade atual das instalações para novos assinantes, tornando desnecessário enviar um especialista em fusões de fibra para ativar cada novo cliente. Com essa abordagem, uma operadora terá a capacidade de ativar seus novos clientes de forma mais ágil e simples, além de aumentar a produtividade das equipes de campo. Os conectores de campo, cabos ópticos e splitters utilizados nesse projeto são materiais padronizados e especialmente adequados para uso em redes PON. Essa padronização garante a compatibilidade e confiabilidade dos componentes, tornando a implementação e manutenção da rede mais eficiente.

Essa escolha estratégica permite a redução de custos operacionais e a otimização dos recursos, contribuindo para uma expansão mais rápida e econômica da rede. Além disso, ao utilizar materiais padronizados e apropriados para redes PON, a operadora assegura a qualidade e a integridade da infraestrutura, promovendo uma experiência satisfatória aos clientes finais.

Diante disso a arquitetura proposta se mostra inovadora, sendo uma rede óptica capaz de atender diferentes públicos de acordo com a sua necessidade de banda de internet, já que com o aumento da demanda de banda no mercado, e novas

tecnologias estão surgindo a todo instante, sendo necessário que os provedores de internet estejam preparados para suprir essas demandas, sejam de empresas ou de clientes residenciais. E devido a facilidade e agilidade com que os técnicos poderão fazer a instalação, o tempo para ativação de novos clientes permitirá os provedores ativar mais clientes em um menor espaço de tempo, suprimindo a atual demanda de internet do momento.

A validação desta arquitetura proposta foi realizada por meio de simulações ocorridas no software optisystem, onde antes de serem iniciados foram estudadas todas as normas referentes as tecnologias abordadas neste trabalho, além de ser utilizado um projeto construído em um bairro na cidade de Fortaleza para a retirada de dados para as simulações. Esses dados ajudaram a conhecer os limites da utilização da coexistência do XGPON e GPON, pois apesar do alcance máximo suportado de cada tecnologia ser de 20 km, este valor não foi obtido quando foi utilizado uma infraestrutura para atender diversos clientes, sendo necessário a adição de alguns componentes que causam atenuação. Foram feitos testes com a rede montada no software Qgis, e foi visto que com uma rede capaz de atender até 32 clientes por porta PON e com um alcance de 9 km (dobro do alcance máximo da rede construída), a BER e o diagrama de olho seguiram os valores dentro dos padrões necessários. Mas ao tentar atender até 64 clientes por porta PON, foi visto que para seguir as recomendações seria necessário que a distância máxima ficasse abaixo de 8 km, sendo um valor recomendado por esse trabalho para projetos que desejam utilizar dois splitters de 1x8 em sua construção. Nas tabelas 8 e 9 podemos observar o resultado da BER nos testes.

BER- Resultados dos testes		
Tecnologia	BER Distância 4,5km	BER Distância 9km
GPON 1:32 Upstream	10^{-22}	10^{-17}
GPON 1:32 Downstream	10^{-18}	10^{-15}
XGPON 1:32 Upstream	10^{-72}	10^{-43}
XGPON 1:32 Downstream	10^{-51}	10^{-29}
GPON 1:64 Upstream	10^{-14}	10^{-09}
GPON 1:64 Downstream	10^{-14}	10^{-11}
XGPON 1:64 Upstream	10^{-37}	10^{-20}
XGPON 1:64 Downstream	10^{-19}	10^{-10}

Tabela 8: Resultados dos testes.

Fonte: Autor.

BER - Resultados dos testes com a distância até 8km	
Tecnologia	BER Distância 8km
GPON 1:64 Upstream	10^{-10}
GPON 1:64 Downstream	10^{-12}
XGPON 1:64 Upstream	10^{-22}
XGPON 1:64 Downstream	10^{-11}

Tabela 9: Resultados dos testes até 8km.

Fonte: Autor.

Os materiais selecionados para este projeto estão em total conformidade com as recomendações das tecnologias GPON e XGPON, garantindo que atendam aos padrões estabelecidos para redes de fibra óptica de última geração. É importante ressaltar que esses materiais estão prontamente disponíveis no mercado brasileiro, o que facilita a implementação da arquitetura proposta em redes reais.

A disponibilidade desses materiais no mercado nacional é um aspecto crucial, pois garante que as soluções propostas sejam viáveis e acessíveis para implementação por provedores de serviços de telecomunicações e empresas de infraestrutura de rede. Além disso, a conformidade com as tecnologias GPON e XGPON assegura que o sistema seja capaz de oferecer altas taxas de transmissão de dados, confiabilidade e eficiência operacional.

5.1 Sugestão de trabalhos futuros

Este trabalho representa uma solução relevante para atender à crescente demanda por internet, tirando proveito da infraestrutura já existente da tecnologia GPON para a implementação do XGPON. No entanto, é fundamental reconhecer que o estudo sobre redes PON não pode se limitar apenas às tecnologias XGPON. Com o surgimento constante de novas tecnologias, como as NG-PON2, uma revisão bibliográfica mais aprofundada se faz necessária para compreender melhor esses avanços.

A evolução acelerada dos serviços que dependem de internet cria desafios para os provedores, pois a banda transmitida muitas vezes não é suficiente para suprir a crescente necessidade de seus clientes. Portanto, é imprescindível analisar as opções disponíveis e garantir que a infraestrutura e os equipamentos já existentes, como GPON e XGPON, possam ser aproveitados de forma eficiente. Logo seguindo esse conceito de preservar o investimento na infraestrutura e nos equipamentos, é

essencial realizar um estudo detalhado para avaliar a possibilidade de migração e coexistência das tecnologias nas novas gerações de redes PON. A metodologia aplicada neste trabalho pode ser utilizada como base para esse novo estudo, permitindo uma transição suave e eficiente para as tecnologias futuras.

Assim, o desenvolvimento contínuo de estudos e pesquisas sobre as redes PON, considerando as novas tecnologias e a coexistência das gerações, é essencial para manter a eficiência e a competitividade das infraestruturas de comunicação e garantir a melhor experiência possível aos usuários de internet e outros serviços dependentes dessa tecnologia em constante evolução.

6 Referências

- [1] ITU-T Recommendation G.987.2 “10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification”, Janeiro, 2010.
- [2] Cianet, Disponível em: <https://www.cianet.com.br/infraestrutura-e-tecnologia/epon/>. Acesso: 14/06/2023.
- [3] IBGE, Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/34954-internet-ja-e-acessivel-em-90-0-dos-domicilios-do-pais-em-2021#:~:text=Em%202021%2C%20entre%20os%20183,a%20rede%20p%C3%ABlica%20de%20ensino>. Acesso: 25/07/2023.
- [4] Olhar Digital, Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2021/05/13/coronavirus/durante-a-pandemia-consumo-de-internet-dobra-no-brasil/>. Acesso: 25/07/2023.
- [5] KEISER, Gerd. Comunicações Por Fibras Ópticas. Quarta Edição. Brasil. Editora McGraw Hill Brasil, 2014.
- [6] Anatel, Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/balanco-dos-servicos-de-telecom-mostra-crescimento-expressivo-da-banda-larga>. Acesso em: 15/05/2023;
- [7] Fiber To The Home Council Europe “FTTH Handbook”, Fevereiro 2012.
- [8] Fibrastore, Disponível em: <https://www.fibrastore.com.br/post/guia-basico-sobre-sfp-gpon> Acesso: 15/15/2022.
- [9] Cruz, Andrine Mariana Varela da, and Mauricio Ricardo Konopacki. *Redes GPON como solução para FTTH*. BS thesis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.
- [10] Blog Intelbras, O que é GPON: saiba mais sobre essa tecnologia. Disponível em: <http://blog.intelbras.com.br/o-que-e-gpon/> . Acesso em: 20/06/2022.

[11] White Paper Huawei. “Next-Generation PON evolution”, 2010.

[12] ITU-T Recommendation G.987.1 “10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements”, Janeiro, 2010.

[13] Venko, Disponível em: <https://venkonetworks.com/noticias/o-que-e-xgs-pon.php>. Acesso:10/07/2023.

[14] ITU-T Recommendation G.987.2 “10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification”, Janeiro, 2010.

[15] ITU-T Recommendation G.652. “Characteristics of a single-mode optical fibre and cable”, Novembro 2011

[16] Tecwi, GPON e XGPON. Disponível em: [https://www.tecwi.com.br/blog/post/evolucoes-gpon-xg-pon-ng-pon-e-xgspon#:~:text=NG%2DPON2%20\(Next%20Generation%20PON%202\)&text=N%C3%A3o%20%C3%A9%20apenas%20uma%20vers%C3%A3o,PON2%20coexiste%20com%20o%20GPON](https://www.tecwi.com.br/blog/post/evolucoes-gpon-xg-pon-ng-pon-e-xgspon#:~:text=NG%2DPON2%20(Next%20Generation%20PON%202)&text=N%C3%A3o%20%C3%A9%20apenas%20uma%20vers%C3%A3o,PON2%20coexiste%20com%20o%20GPON). Acesso em: 15/12/2022.

[17] Cardoso, RODRIGO ALVES. *Proposta, simulação e testes de arquitetura para redes ópticas passivas GPON e XG-PON*. Diss. Dissertação de mestrado da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

[18] ITU-T Technical paper “Wireline broadband access network and home networking”, Dezembro 2011

[19] Batagelj, B., Erzen V., Tratnik, J., Naglic, L., Bagan, V., Ignatov, Y., Antonenko, Maxim. “Optical Access Network Migration from GPON to XG-PON”, The Third International Conference on Access Networks, 2012.

[20] Garvery, P. White Paper Corning “An Overview of ITU-T G.657: Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network”, 2012.

[21] Furukawa, Disponível em: <https://www.furukawatam.com/pt-br/catalogo-de-produtos-detalhes/splitter-opticomodular#%3A~%3Atext%3DDescr%C3%A7%C3%A3o-%2CSplitters%20%C3%93pticos%20s%C3%A3o%20componentes%20passivos%20que%20realizam%20a%20divis%C3%A3o%20do%2Ccaracterizando%20Dos%20como%20splitters%20balanceados>. Acesso: 03/06/2023.

[22] Nishioka, D., Ohtsuka, K., Saito, K., Tamekuni, Y., Yokomachi, Y., Hamada, M., "Field Installable Connectors for FTTH Construction", International Wire & Cable Symposium, Novembro, 2005.

[23] Datasheet Caixa NAP Furukawa modelo FK-CTO-16MC, www.furukawa.com.br

[24] Datasheet Conector KANTAN Furukawa, www.furukawa.com.br

[25] Ispblog. Disponível em: <https://www.ispblog.com.br/2017/05/24/recomendacoes-g-652-e-g-657-em-redes-opticas-passivas/>. Acesso em: 25/07/2023.

[26] Qgis, Sobre o Qgis. Disponí em: https://www.qgis.org/pt_BR/site/about/index.html. Acesso em 30/07/2023.

[27] Optical System Tutorials "Extracting the Thermal Noise Parameter for a Specific Receiver Sensitivity" Disponível em www.optisystem.com.

[28] Diagrama de olho. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~sam/Tele2/apontamentos/Pulse_shaping.pdf. Acesso em: 05/06/2023

[29] Silva, Lucas Sousa. "Interferência intersimbólica, ruído e capacidade de canal em um sistema de comunicação através-da-terra." (2017).

[30] ITU-T Recommendation G.984.2. "Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification", Março 2003.

[31] Mraković, M. D.; Matavulj, P. S. "Analysis of Coexisting GPON and NG-PON1 (10GPON) Systems", Telfor Journal, Vol. 3, No. 1, 2011.