



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
FACOMP – FACULDADE DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

**ANÁLISE DE POTÊNCIA ÓPTICA E O MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE
CONEXÕES ENTRE OS TERMINAIS DE UMA REDE DE FIBRA ÓPTICA**

VITOR GABRIEL MENDES DANTAS

Castanhal-PA
2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
FACOMP – FACULDADE DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

VITOR GABRIEL MENDES DANTAS

**ANÁLISE DE POTÊNCIA ÓPTICA E O MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE
CONEXÕES ENTRE OS TERMINAIS DE UMA REDE DE FIBRA ÓPTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao colegiado da Faculdade de Computação da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Lobato Acatauassú Nunes.

Castanhal-PA
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
FACOMP – FACULDADE DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

**ANÁLISE DE POTÊNCIA ÓPTICA E O MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE
CONEXÕES ENTRE OS TERMINAIS DE UMA REDE DE FIBRA ÓPTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado da Faculdade de Computação (FACOMP) da Universidade Federal do Pará do campus de Castanhal, como requisito parcial para a obtenção do Grau de bacharel em ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO.

Prof. Dr. Diogo Lobato Acatauassú Nunes
Orientador-UFPA/FACOMP

Prof. Dr. Clenilson Rodrigues da Silveira
Membro da Banca – Professor-UFPA/FACOMP

Prof. Dr. João Claudio Chamma Carvalho
Membro da Banca – Diretor/Professor-UFPA/FACOMP

Prof. Dr. João Claudio Chamma Carvalho
Diretor (a) da Faculdade de Computação - FACOMP

Castanhal-PA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me ajudaram nesta trajetória, principalmente a minha família materna, que foi o pilar que tornou o meu aproveitamento assíduo na faculdade ser possível e íntegro. Em especial, a grande mulher que desempenhou com excelência o papel de mãe, minha querida avó materna, obrigado por tudo que a Sra me proporcionou durante toda minha vida, principalmente a felicidade de estar ao seu lado e todos os familiares vinculados. Agradeço também o apoio de meus amigos, de dentro e de fora faculdade, meus tios e tias, meus primos e primas, avô materno e meu irmão.

Gostaria de agradecer também ao Prof. Dr. Diogo Acatauassú pela confiança, por ter me orientado durante a produção de meu trabalho, e pela sua disposição em me auxiliar e sua sinceridade.

*“Jamais se deve responder à
injustiça pela injustiça, nem fazer
mal a outrem, nem mesmo àquele
que nos fez mal”*

Sócrates

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	7
LISTA DE TABELAS	8
RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE ABREVIATURAS	11
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2 DEFINIÇÃO DO MEIO DE TRANSMISSÃO ANALISADO	17
2.1 PRINCÍPIO DE PROPAGAÇÃO.....	18
2.2 MODOS DE COMUNICAÇÃO.....	18
2.2.1 FIBRA MONOMODO.....	19
2.2.2 FIBRA MULTIMODO.....	19
3 ELEMENTOS DA REDE E PARÂMETROS DE ANÁLISE	21
3.1 ELEMENTOS DA REDE.....	22
3.2 ENLACE ÓPTICO.....	23
3.3 NÍVEIS DE POTÊNCIA.....	24
3.4 ELEMENTOS ENTRE AS EXTREMIDADES DAS FIBRAS.....	25
4 ARQUITETURA DE DISTRIBUIÇÃO	27
4.1 PADRONIZAÇÃO DA ESTRUTURA.....	28
5 DORES DA INFRAESTRUTURA	30
5.1 ANÁLISE EQUACIONAL.....	30
5.2 BALANCEAMENTO DE NÍVEL DE POTÊNCIA.....	31
5.3 PONTOS DISRUPTORES DE SINAL.....	35
5.4 MANUTENÇÃO DE NÍVEL DE POTÊNCIA.....	36
6 MAPEAMENTO ESTRATÉGICO	41
6.1 ESPECIFICAÇÕES DE CONTEÚDO DA REDE.....	41
6.2 ESQUEMAS DE ENLACE.....	43
6.3 ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	44
6.4 ESQUEMAS DE MESCLA.....	46
7 CONCLUSÃO	49
8 REFERÊNCIAS	50

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1. Balanço financeiro de assinantes da <i>Netflix</i> nos últimos anos.	14
Figura 1.2. Representação abstrata da conexão com a internet	15
Figura 2.1. Estrutura de uma fibra óptica.	17
Figura 2.2. Representação da fibra monomodo.	19
Figura 2.3. Representação da fibra multimodo.	19
Figura 3.1. Topologias de uma rede óptica.	20
Figura 3.2. Elementos que compõem uma rede óptica.	21
Figura 3.3. Funcionamento de um rede óptica.	23
Figura 3.4. Cálculo do nível de potência em dBm em um enlace.	25
Figura 3.5. <i>Transceiver</i> SFP+.	26
Figura 3.6. <i>Transceiver</i> QSFP+.	26
Figura 4.1. Arquitetura Point-to-Point.	27
Figura 4.2. Arquitetura Point-to-Multi-Point.	28
Figura 5.1. Cálculo de perdas e atenuação em dB.	31
Figura 5.2. Caracterização de Enlaces com CEOs.	35
Figura 5.3. Exemplo de aplicação e visualização abstrata de um OTDR.	38
Figura 5.4. Demonstração abstrata do funcionamento da técnica DWDM.	40
Figura 6.1. Exemplo de um “abrigo” de terminal e reorganização.	42
Figura 6.2. Esquemas de uma arquitetura de rede óptica.	44
Figura 6.3. Exemplo da perda de nível de potência no esquema em anel.	45
Figura 6.4. Exemplo da perda de nível de potência no esquema em malha.	46
Figura 6.5. Esquema ideal com mesclas na arquitetura do enlace.	47

LISTA DE TABELA

Tabela 5.1. Exemplo de um relatório de uma PON com o sinal fraco.	32
Tabela 5.2. Exemplo de um relatório de uma PON com o sinal forte.	33
Tabela 5.3. Exemplo de um relatório de uma PON com sinal com dispersão.	34
Tabela 5.4. Valores de referência para alguns componentes ópticos.	37

RESUMO

Devido a pandemia de COVID-19, muitos serviços foram migrados para a internet com intuito de atender a demanda respeitando o distanciamento social. Por isso, redes de acesso de alta capacidade de transmissão de dados se tornam cada vez mais necessárias, e isso ocorre como em tempos passados com outras situações. Neste contexto, este Trabalho de Conclusão de Curso aborda sobre a construção de redes passivas de fibra óptica, explicando como ocorre a distribuição de conexões com a rede mundial de computadores a partir delas. Dentre as diretrizes do assunto, também será explicitado os benefícios de utilizar a linha de transmissão de fibra óptica, os obstáculos que são enfrentados pelos provedores de internet e como estes podem ser evitados a partir de um mapeamento analítico.

PALAVRAS-CHAVES: Arquitetura de Enlace, Fibra Óptica, Internet, Linha de Transmissão.

ABSTRACT

Due to the pandemic of Covid-19, many services were migrated to the internet in order to meet the demand respecting social detachment. Therefore, high-capacity data transmission networks become increasingly necessary, and this occurs as in times past with other situations. In this context, this course completion work addresses the construction of passive fiber optic networks, explaining how the distribution of connections to the worldwide network of computers occurs from them. Among the subject guidelines, it will also be explained the benefits of using the fiber optic transmission line, the obstacles that are faced by internet providers and how they can be avoided from an analytical mapping.

KEYWORDS: Link architecture, Internet, Optical fiber, Transmission line.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWG	<i>American Wire Gauge</i>
BGP	<i>Border-Gateway-Protocol</i>
CGNAT	<i>Carrier-Grade Network Address Translation</i>
COVID-19	<i>Coronavirus Disease 2019</i>
CSO/CEO	<i>Case Seam Optical/Caixa de Emenda Óptica</i>
CTO	<i>Case Terminal Optical</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
FTTA	<i>Fiber-to-the-Antenna</i>
FTTB	<i>Fiber-to-the-Building</i>
FTTC	<i>Fiber-to-the-Curb</i>
FTTH	<i>Fiber-to-the-Home</i>
GBIC	<i>Gigabit-Interface-Convertor</i>
G-PON	<i>Gigabit Passive Optic Network</i>
IDC	<i>International Data Coporation</i>
IPv4	<i>Internet Protocol version 4</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
LAN	<i>Local Area Networks</i>
NAT	<i>Network Address Translation</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
ONT	<i>Optical Network Terminal</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
OTDR	<i>Optical Time-Domain Reflectometer</i>
P2MP	<i>Point-to-Multi-Point</i>

P2P	<i>Point-to-Point</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
QSFP	<i>Quad Small-Form-Factor-Pluggable</i>
QSFP+	<i>Quad Small-Form-Factor-Pluggable-Plus</i>
SFF	<i>Small Form Factor</i>
SFP	<i>Small-Form-Factor-Pluggable</i>
SFP+	<i>Small-Form- Factor-Pluggable-Plus</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexed</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
XG-PON	<i>Teen Gigabit Passive Optic Network</i>

1 INTRODUÇÃO

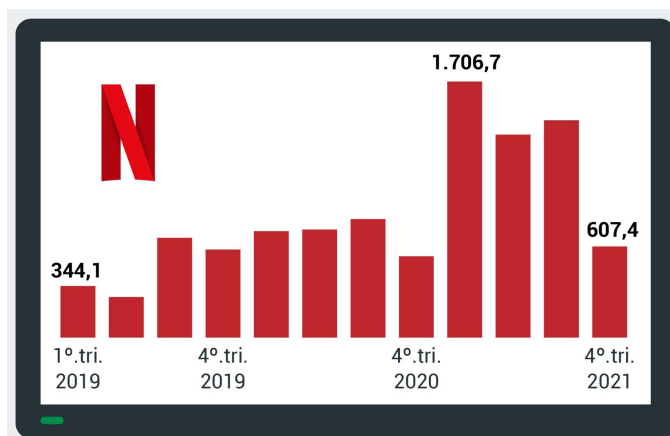
1.1 Contextualização

Assim como em tempos passados, a necessidade de integralização de serviços junto a rede mundial de computadores tem se mostrado muito grande e em constante crescimento. Por conta disso, se faz preciso que redes de acesso de alta capacidade de fluxo de dados estejam interconectadas para que seja possível a distribuição de conteúdos digitais com qualidade e integridade. Segundo o IDC (*International Data Corporation*), até 2019, mais da metade (cerca de 55,14%) dos serviços consumidos pelas pessoas já possuíam uma instância em computação em nuvem, e isso somente no Brasil.

A estimativa, na época, era que até 2021, essa taxa aumentaria 8%, porém esse cálculo não considerou o período pandêmico provocado pelo vírus SARS-COV-2, em que todos as pessoas tiveram que prevenir o contato físico e viver um período em quarentena. Como em situações por volta do ano 2000, esse período consiste em uma grande pressão global entre muitas áreas, e nesse caso, no setor de telecomunicações, é intensificado a necessidade da capacidade de tráfego maior da informação. Em decorrência disso, os serviços utilizados até então tiveram que se reinventar, obedecendo as normas, e a partir desse formato migraram para a rede mundial de computadores.

Os servidores em nuvem foram elevados ao máximo, devido a alta quantidade de acesso. Por exemplo, um dos maiores serviços de distribuição de vídeo em tempo real, a *Netflix*, identificou um grande aumento de assinantes até quarto semestre de 2020, como podemos identificar na Figura 1.1. Esse número só voltou a cair no quarto semestre de 2021, quando foram promovidas medidas de retorno das atividades e a efetivação da vacinação mundial.

Figura 1.1. Balanço financeiro de assinantes da *Netflix* nos últimos anos.



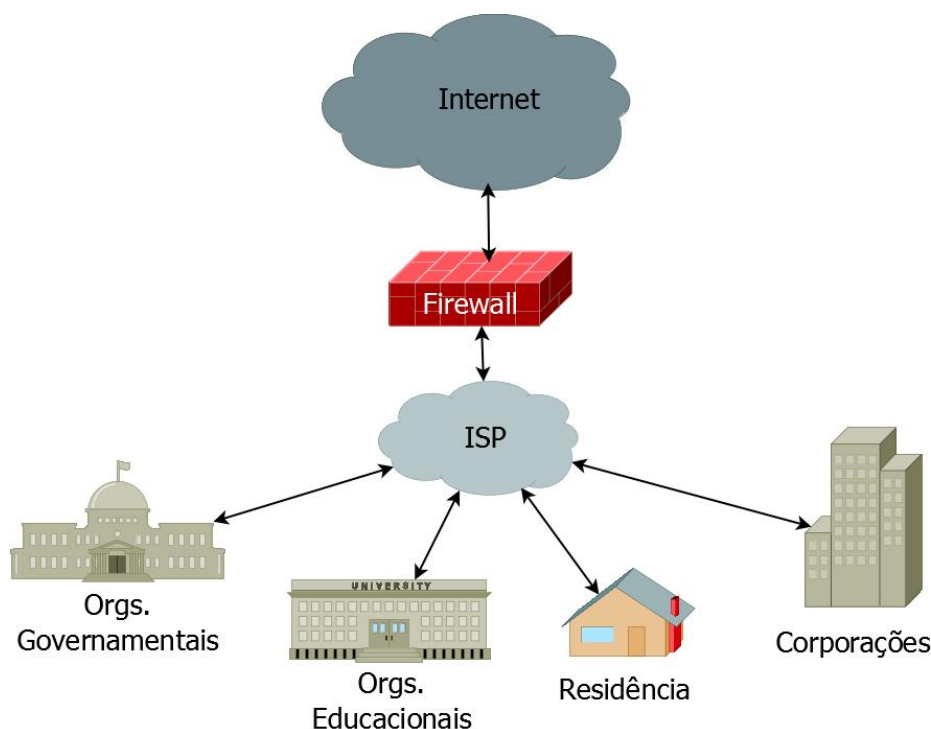
Fonte: (Netflix, Poder360, 2022).

Com essa quantidade de demanda, os meios de acesso que levam a rede mundial de computadores tiveram que suprir o processamento de dados em grande quantidade, e isso tornou a fibra óptica um dos maiores facilitadores em relação a essa transmissão. Em outras palavras, para um alto tráfego de informações, deve-se possuir uma infraestrutura que permita tal capacidade de dados além de altas velocidades, para que todos os serviços possam ser acessados simultaneamente com eficiência. A fibra óptica foi um elemento muito importante para globalização de vários serviços digitais conhecidos atualmente, provendo altas taxas de transmissão, o que tornou possível o acesso de todos com baixo tempo de resposta e melhor variedade de serviços consumíveis.

1.2 Objetivos

Nessa perspectiva, o objetivo deste trabalho é descrever e fundamentar como se dá a distribuição de conexões à rede mundial de computadores por meio de conexões de fibra óptica por provedores de internet, representado na Figura 1.2, conhecidos como ISPs (*Internet Service Providers*). Além disso, o trabalho descreve um dos principais obstáculos enfrentados pelos provedores, a saber, a distribuição dos níveis de potência entre os elementos da rede. Este trabalho visa elucidar de forma simples como realizar e projetar mapeamentos eficientes de terminações de fibra através de medidas de análise, parametrização e arquitetura lógica, evitando assim problemas na infraestrutura de distribuição.

Figura 1.2. Representação abstrata da conexão com a internet.



Fonte: (Autor, 2022).

Nos primeiros capítulos, a fibra óptica será detalhada e será descrito porque esse meio de transmissão possibilitou e facilitou a utilização de serviços digitais em larga escala, na maioria deles com o fluxo de dados em tempo real com alta taxa de transmissão. Nos capítulos intermediários, serão apresentadas informações sobre os elementos que compõe uma rede de acesso de fibra óptica passiva. Por fim, nos capítulos finais, será abordado como a rede pode ser projetada para alcançar uma arquitetura íntegra, além de como os problemas causados pela falha de um mapeamento analítico podem ser solucionados e também evitados.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, e estes estão descritos da seguinte forma:

Capítulo 2: Este capítulo descreve a composição e as características da fibra óptica, esclarecendo como ocorre a propagação da luz ao longo dessa linha de transmissão.

Capítulo 3: Este capítulo descreve os elementos que compõe uma rede de acesso de fibra óptica e detalha os parâmetros que serão analisados ao longo do trabalho, em especial o nível de potência dos sinais. Tal parâmetro deve ser considerado quando

analisamos a distribuição de feixes ópticos em uma infraestrutura passiva. Os componentes utilizados nas redes são detalhados e é explicado como os mesmos operam em configurações de rede que seguem o modelo de camadas OSI (*Open System Interconnection*).

Capítulo 4: Este capítulo aborda as formas como podem ocorrer a distribuição das conexões nas redes de acesso de fibra óptica. Isto é, como os enlaces são constituídos. Ele descreve cada uma das arquiteturas e como elas são empregadas dentro de uma rede de distribuição, assim como os aspectos dos componentes da rede e como eles se comportam.

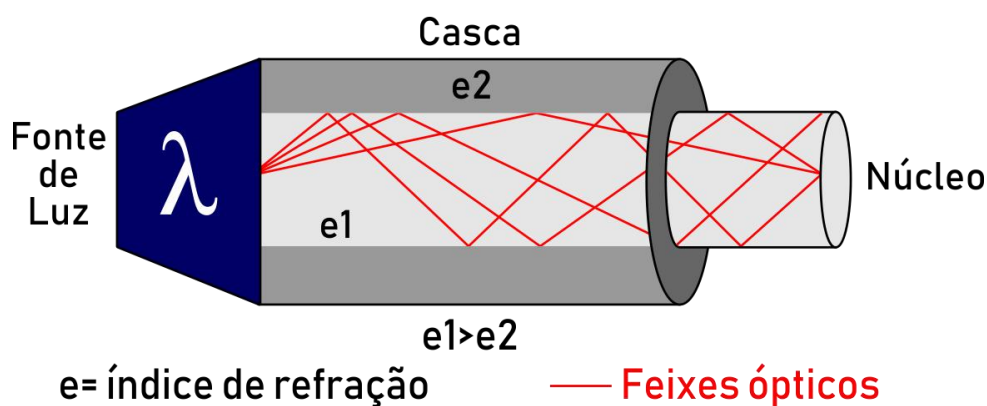
Capítulo 5: Este capítulo descreve as dores da infraestrutura, sendo composto pelos erros que podem acontecer se não forem respeitados os limites da rede de fibra óptica a partir do nível de potência dos sinais transmitidos e recebidos. A composição da arquitetura pode, por consequência, ocasionar falhas sejam elas de estruturação ou acidentais, entretanto, será argumentado sobre as resultantes e suas soluções.

Capítulo 6: O último capítulo aborda como a infraestrutura da rede pode ser projetada, levando em consideração parâmetros base de análise. O objetivo é idealizar uma rede concisa e sem falhas estratégicas, tornando a distribuição sólida, funcional e de alta capacidade e qualidade em redes ópticas, através de um mapeamento eficiente.

2 DEFINIÇÃO DO MEIO DE TRANSMISSÃO ANALISADO

O meio de transmissão utilizado para pesquisa é a fibra óptica, que é o meio físico mais rápido e eficiente em uso atualmente, principalmente em comunicações de longa distância, sem muita perda ou impacto. Conforme mostrado na Figura 2.1, as fibras são tipicamente compostas de sílica (núcleo de fibra) e polietileno (invólucro), que são materiais dielétricos inerentes que impedem o fluxo de corrente elétrica. A sílica ou dióxido de silício (SiO_2 - fórmula química) tem a propriedade de ser insolúvel na maioria dos solventes e possui apolaridade (poucos ou nenhum polo).

Figura 2.1. Estrutura de uma fibra óptica.



Fonte: (Autor, 2022)

O princípio fundamental que rege o funcionamento das fibras ópticas é a reflexão total da luz, essa reflexão ocorre de um meio com maior índice de refração para um meio com menor índice de refração, tornando-a um excelente meio de transmissão utilizado em sistemas que exigem altas taxas, tais como: o sistema telefônico, videoconferência, redes locais (LANs - *Local Area Networks*), etc. É possível identificar aspectos superiores da fibra óptica em relação aos cabos metálicos usuais: a fibra óptica possui alta imunidade a interferências eletromagnéticas, o que significa que os dados, possuem uma chance baixa de serem corrompidos durante a transmissão. Além disso, a fibra óptica possui baixa condutibilidade de corrente elétrica, e nesse sentido, esses elementos não sofrem incidência com eletricidade, como problemas de diferença de potencial elétrico ou problemas com raios. [TRONCO R., AVILA DE F. - 2007].

2.1 Princípio de propagação

Na natureza, todo espectro eletromagnético possui aspectos naturais tanto ondulatórios (λ - amplitude, f - frequência, ...) quanto corpusculares (m - massa, v_m - velocidade média, ...), e a luz, sendo uma energia que irradia feixes, é tratada como a representação de um dinamismo harmônico contínuo. A luz por definição, propaga-se a uma velocidade de 299.792.458 m/s (metros por segundo) de acordo com o SI (Sistemas Internacional de unidades) sendo constante até o momento.

“

O princípio básico de transmissão da luz ao longo da fibra consiste num processo de reflexão interna total que ocorre quando um feixe de luz, em termos de índice de refração, emerge de um meio mais denso para um meio menos denso.

[TRONCO R., AVILA DE F. - 2007].

”

2.2 Modos de Comunicação

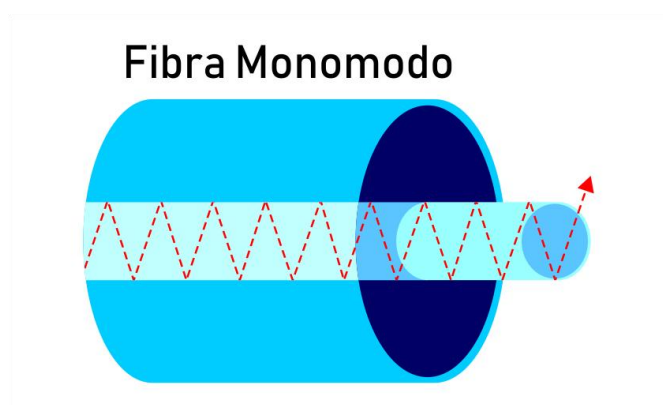
Assim como os cabos metálicos possuem categorias que indicam as capacidades de transmissão, com a fibra não é diferente. Isso ocorre já que uma mesma linha de transmissão pode se comportar de diferentes maneiras dependendo das suas características construtivas e da maneira como é produzida. Nesse aspecto, a “bitola” é o que classifica do tipo da fibra, no caso da fibra, estamos tratando de cabos que possuem μm (micrômetros) de espessura.

Diante dessa apresentação, a fibra se difere pelo tamanho do diâmetro e também como a forma em que a luz se propaga em seu interior em decorrência desse tamanho, sendo classificada em dois tipos, que serão descritos na próxima Subseção.

2.2.1 Fibra Monomodo

As fibras monomodo são adequadas para aplicações que envolvam grandes distâncias, embora requeiram conectores de maior precisão e dispositivos de alto custo. Nas fibras monomodo, representada na Figura 2.2, a luz possui apenas um modo de propagação, ou seja, a luz percorre o interior do núcleo por apenas um caminho, e as dimensões do núcleo da fibra variam entre 8 μm e 12 μm , e a casca em torno de 125 μm . [TRONCO R., AVILA DE F. - 2007].

Figura 2.2. Representação da fibra monomodo.

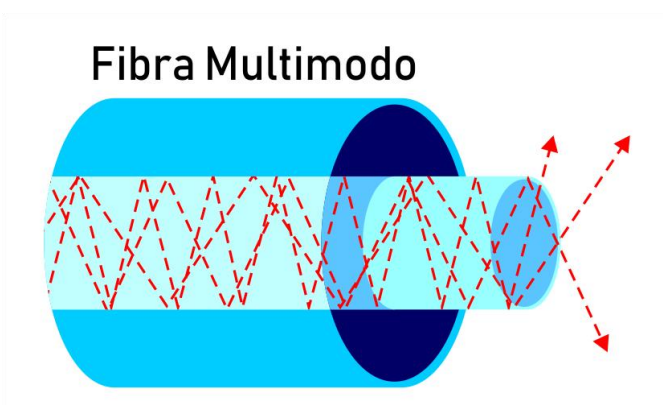


Fonte: (Autor, 2022)

2.2.2 Fibra Multimodo

As fibras multimodo possuem o diâmetro do núcleo maior do que as fibras monomodo, de modo que a luz tenha vários modos de propagação, ou seja, a luz percorre o interior da fibra óptica por diversos caminhos. As dimensões do núcleo de fibra variam de 50 μm a 200 μm e 125 μm a 400 μm para a casca. As fibras multimodo, representada na Figura 2.3, são mais baratas que as monomodo e são usadas para curta distância, por exemplo, em LANs. [TRONCO R., AVILA DE F. - 2007].

Figura 2.3. Representação da fibra multimodo.



Fonte: (Autor, 2022)

Os elementos descritos aqui irão compor as arquiteturas que serão apresentadas e analisadas no capítulo posterior. Eles serão essenciais para o entendimento das topologias de distribuição de sinal óptico.

3 ELEMENTOS DA REDE E PARÂMETROS DE ANÁLISE

Esse capítulo descreve os equipamentos utilizados em uma rede óptica passiva. Tais aparelhos são utilizados para conectar cidades grandes e médias junto a internet. Não serão abordados nele os métodos de conexão à rede em si, como o método de acesso dos aparelhos através do protocolo de internet (IP - *Internet Protocol*), entretanto, serão apresentadas algumas topologias com representações de uma rede funcional, com ênfase nas camadas 1 e 2 do modelo OSI (modelo homologado pela ISO - *International Standards Organization*) sendo elas: Física e Enlace de dados, respectivamente.

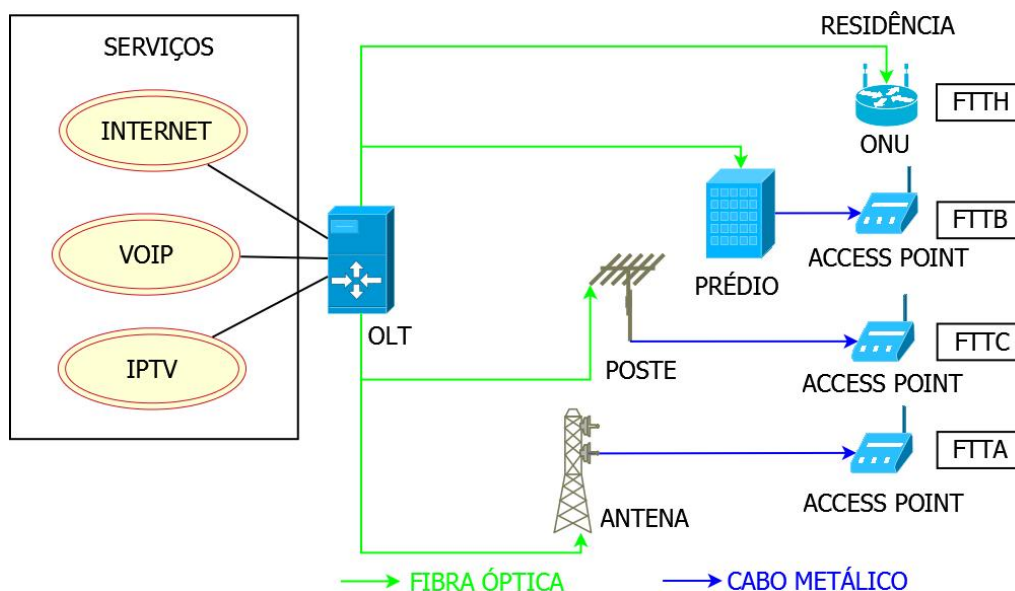
“

Esse modelo se baseia em uma proposta desenvolvida pela ISO como um primeiro passo em direção à padronização internacional dos protocolos usados nas várias camadas. Ele trata da interconexão de sistemas abertos — ou seja, sistemas abertos à comunicação com outros sistemas.

[TANENBAUM S., WETHERALL J. - 2010]

”

Figura 3.1. Topologias de uma rede óptica.



Fonte: (Autor, 2022)

Em termos das topologias, existem diversos arranjos de conexão, representados na Figura 3.1, que podem ser utilizados por provedores de internet que utilizam fibra óptica como camada física. Esses arranjos podem ser distribuídos e terminados em uma

antena (FTTA - *Fiber-to-the-Antenna*), poste (FTTC - *Fiber-to-the-Curb*) ou em um prédio (FTTB - *Fiber-to-the-Building*) e as conexões a partir desse ponto ocorrem por outros meios físicos de transmissão, como por exemplo o cabo metálico. Uma das topologias mais utilizadas, e que será analisada neste trabalho é a FTTH (*Fiber-to-the-Home*), na qual todo o percurso até o equipamento passivo da LAN é feito utilizando fibra.

“

A estratégia das redes ópticas passivas é levar a fibra óptica o mais próximo possível do usuário final e, conseqüentemente, reduzir a extensão não óptica da rede de acesso. Instalar a fibra óptica até o local onde se encontra o usuário traz inúmeras vantagens, como largura de banda praticamente ilimitada e provimento de serviços que necessitam de altas bandas de transmissão.

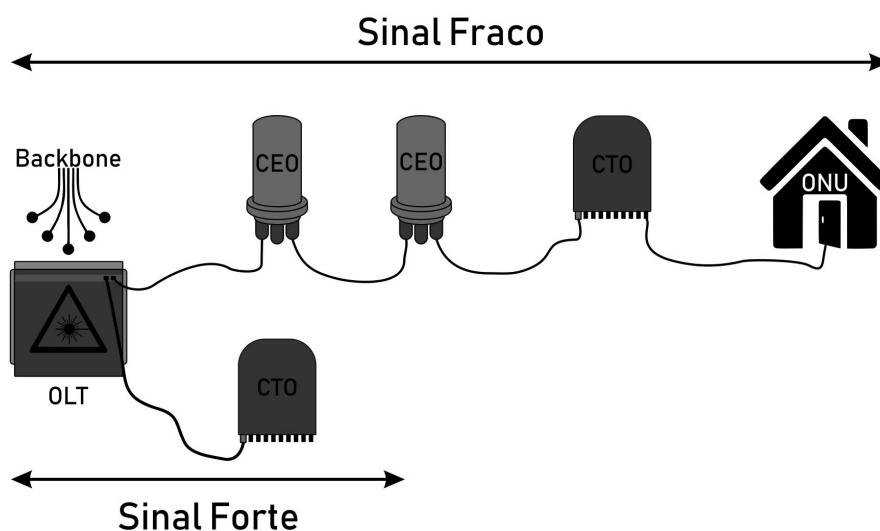
[PINHEIRO, JOSÉ. 2017]

”

3.1 Elementos da rede

Os elementos que compõe uma rede de fibra óptica são mostrados na Figura 3.2 e descritos abaixo:

Figura 3.2. Elementos que compõem uma rede óptica.



Fonte: (Autor, 2021)

- OLT (*Optical Line Terminal*) - é um computador/servidor que gerencia a distribuição óptica entre as redes passivas e os equipamentos passivos. Possui como elementos físicos as lâminas (*slots*), e nelas contém portas para construção de redes passivas.
- PON (*Passive Optical Network*) - é uma porta física de um *slot* de OLT que segmenta a distribuição de forma a manter uma estrutura lógica, mas que constitui vários elementos físicos passivos.
- CTO (*Case Terminal Optical*) - é um elemento de uma PON que, com o auxílio do balanceamento de um *splitter* (separador de núcleo de fibra óptica), distribui potência e alimenta os elementos de borda da rede.
- CSO (*Case Seam Optical*) - também chamada de CEO ou caixa de emenda óptica, é um ponto de emenda entre fibras. Utilizando um circuito sem alimentação e sem dobras atenuantes, o CSO consegue unir duas fibras de *backbone* (fibra monomodo de longa distância) através de fusão, sem muitas perdas de níveis de potência.
- ONU (*Optical Network Unit*) e ONT (*Optical Network Terminal*) - é o equipamento de borda da rede física, e também o equipamento óptico passivo mais próximo ao usuário final (consumidor). O ONU é o elemento de acesso a conexão com a rede óptica e o elemento base para criação da rede de acesso local a partir da topologia FTTH. Este dispositivo é o responsável pelas transições de sinal óptico para elétrico e também de elétrico para sinal óptico.

A partir desses elementos básicos, podemos prosseguir com a análise de distribuição das conexões da rede. Esses elementos são a base que compõem o enlace óptico, e a partir deles é possível realizar a distribuição da conexão fisicamente em fibra durante todas as rotas e percursos. Dentro desse contexto, será abstraído o uso de equipamentos como roteadores e comutadores (*switches*) gerenciáveis da rede. Atualmente, a configuração ainda predominante nos provedores é o protocolo de internet versão 4, o IPv4 (*Internet Protocol version 4*), sendo assim para a modelagem da distribuição das redes de acesso será também abstraído componentes como, o BGP (*Border-Gateway-Protocol*) e o CGNAT (*Carrier-Grade Network Address Translation*) que são responsáveis por gerenciar as rotas e distribuir portas em IPs, respectivamente.

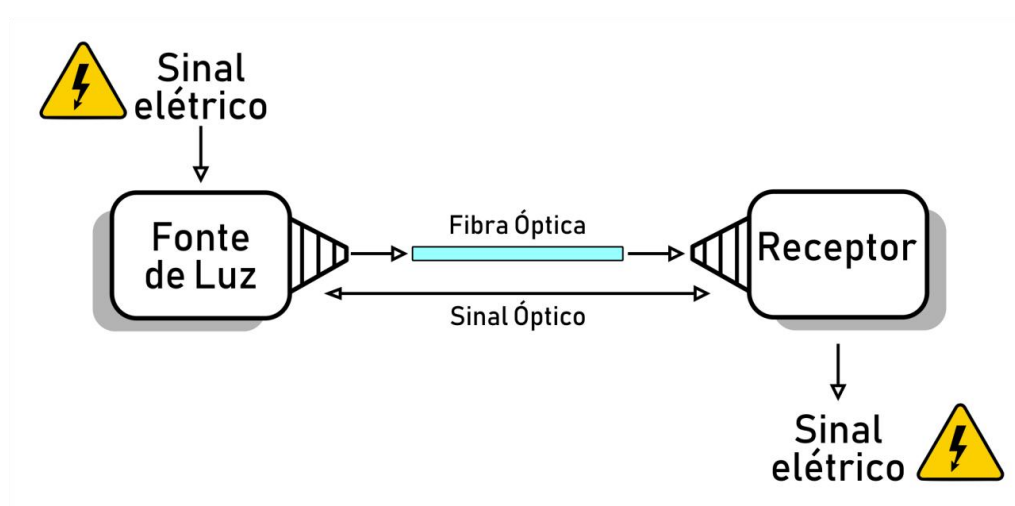
3.2 Enlace Óptico

Um enlace óptico possui uma composição que toma uma entrada elétrica e a converte para uma saída óptica com o uso de um transmissor óptico. A luz do transmissor é acoplada na fibra mediante um conector e, então, transmitida através do cabo óptico. No outro extremo, a luz é acoplada por meio de um receptor e um detector efetua a conversão do sinal óptico em sinal elétrico novamente, que é apropriadamente configurado para uso do equipamento. [PINHEIRO, JOSÉ. 2017].

Esses componentes, na topologia de comunicação, são respectivamente o terminal de fibra (OLT) e o dispositivo passivo (ONU ou ONT). A rede é chamada de passiva porque a rede óptica de distribuição contém apenas elementos passivos; os únicos elementos ativos na rede PON são a própria OLT, localizada junto ao provedor de serviços, e as ONUs, que se encontram nas localidades dos usuários. [ETHEL B., RAISA O.V, DIVANILSON R. - 2012].

Dependendo da fabricação dos equipamentos, cada fabricante adota um valor base para o receptor do dispositivo, e isso é um elemento importante na distribuição e balanceamento do nível de potência, pois em decorrência do nível de potência utilizado, o equipamento pode ter o desempenho prejudicado. Os sistemas constituídos por redes ópticas, são representados com o seguinte funcionamento na Figura 3.3 abaixo.

Figura 3.3. Funcionamento de um rede óptica.



Fonte: (Autor, 2021)

3.3 Níveis de Potência

O nível de potência de uma rede óptica é fundamental para estruturação e para construção da mesma, pois é o elemento principal para criação de um enlace funcional.

O nível de potência para comunicação óptica é um valor determinado e necessário para que o sinal de luz no transmissor (sinal Tx - *transceiver*) possa percorrer o enlace ou a rede e chegar até o receptor (sinal Rx - *receiver*) de modo que este possa detectá-lo e operar adequadamente.

Para projetar e construir uma rede de fibra óptica é preciso estabelecer, medir e relacionar os níveis de potência do sinal óptico presentes em cada um dos elementos da rede. Na fibra óptica, a intensidade do sinal normalmente reduz de forma exponencial. Esta perda é designada em termos do logaritmo da razão entre as potências recebida e transmitida. O decibel (dB) é um número relativo e permite representar relações entre duas grandezas de mesmo tipo, como relações de potências, tensões, correntes ou qualquer outra relação adimensional. Portanto, permite definir ganhos e atenuações, relação sinal/ruído, etc. As escalas logarítmicas são usadas em telecomunicações para medir relações de potências de sinais em virtude das grandes variações existentes entre estes sinais. [PINHEIRO, JOSÉ. 2017].

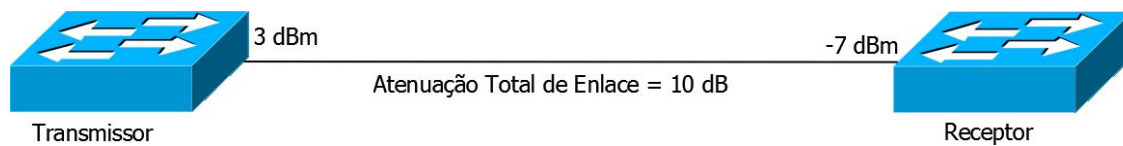
“

O dB é uma representação em escala logarítmica muito usada em telecomunicações, pois nessa situação é utilizado números extremamente grandes ou pequeno e se torna mais útil presumir ganhos e atenuações através dessa representação.
[PINHEIRO, JOSÉ. 2017]

”

Como decibel é uma unidade relativa e não absoluta, o nível de potência e sua magnitude são representados por decibel miliwatt (dBm). Essa medida permite identificar se há uma atenuação ou dispersão do sinal óptico na medida em que o mesmo percorre o enlace. Um importante ponto de análise é a potência de recepção, que pode ser calculada utilizando como medida base, a atenuação total do enlace e a potência de transmissão de um dos pontos. O segmento de exemplo de uma rede óptica apresentado na figura abaixo, apresenta uma atenuação total de 10 dB (incluindo pontos de fusão) entre um transmissor e um receptor. Se a potência do transmissor é de +3 dBm, será interessante identificar qual será a potência óptica na entrada do receptor no enlace da Figura 3.4.

Figura 3.4. Cálculo do nível de potência em dBm em um enlace.

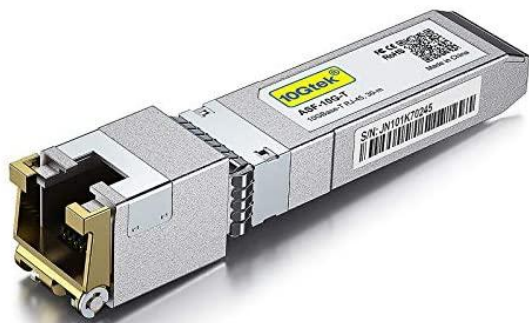


Fonte: (Autor, 2022)

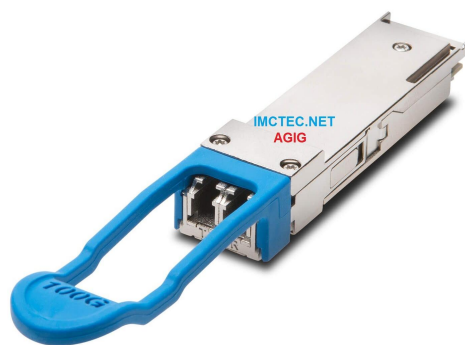
Nesse caso a potência na entrada do receptor em dBm é igual a potência na saída do transmissor somado a atenuação total do enlace (que por sua vez é menor que zero), portanto, identificamos que potência na entrada do receptor pode ser de -7 dBm, podendo variar uma margem de 1 dB para mais ou menos, dependendo de fatores como a própria sensibilidade do *transceiver*.

3.4 Elementos entre as extremidades das fibras

As pontas das fibras possuem conectores que conseguem operar em altas taxas de transmissão e recepção. Juntamente com os *transceivers* e *receivers*, eles atuam na conversão do sinal óptico para o sinal elétrico, e seus pulsos trafegados conseguem alcançar facilmente 100 Gigabits por segundo entre pontos terminais. Com exceção dos dispositivos passivos, todos os circuitos que operam para distribuição dos sinais de luz utilizam esses conectores. Geralmente, para transmissão em longas distâncias, o mais empregado é o *transceiver* SFP (*Small-Form-Factor-Pluggable*) ou SFP+ (*Small-Form-Factor-Pluggable-Plus*) apresentado na Figura 3.5, apelidado de mini GBIC (*Gigabit-Interface-Converter*), que era o antigo *transceiver* utilizado. Entretanto, devido ao seu tamanho, o mesmo foi substituído pelo *transceiver* QSFP (*Quad Small-Form-Factor-Pluggable*) ou QSFP+ (*Quad Small-Form-Factor-Pluggable-Plus*) apresentado na Figura 3.6.

Figura 3.5. *Transceiver SFP+.*

Fonte: (Amazon, 2016)

Figura 3.6. *Transceiver QSFP+.*

Fonte: (IMCTEC, 2003)

Os transceptores para fibras ópticas mais usados em redes passivas são a unidade externa plugável SFP, para inserção no equipamento, e a unidade interna SFF (*Small Form Factor*), fixada diretamente na placa eletrônica do dispositivo. Uma das principais características dos módulos SFP é que eles podem ser inseridos ou retirados sem desligar a alimentação do equipamento de rede (são ditos *hot-pluggable*). Em redes PON, um SFP é utilizado em conjunto com o OLT para possibilitar a interface óptica deste equipamento com a rede de fibra, seguindo um padrão de especificação de classe de laser que indica a potência na qual o equipamento deve funcionar. [PINHEIRO, JOSÉ. 2017].

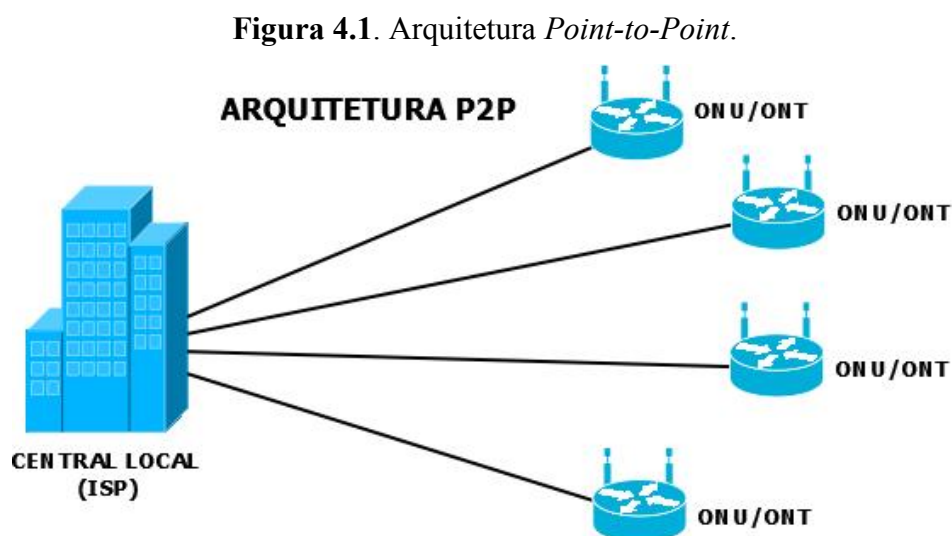
Esses dispositivos de extremidades são muito relevantes na análise de distribuição, pois eles orquestram os níveis de potência que devem ser utilizados entre os terminais, e toda a infraestrutura do enlace deve ser construída a partir dos parâmetros de fabricação dos mesmos. Em geral, os *transceivers* utilizam intervalos entre +2,0 dBm e +7,0 dBm para Tx e entre -6,0 dBm e -28,0 dBm para Rx. Fora desse nível de potência há pouca comunicação devido a atenuação (nível de potência baixo) ou saturação (nível de potência alto). A partir da ideia de como ocorre a distribuição dos níveis de potência, precisamos identificar também como é projetada e idealizada uma topologia de distribuição levando-se em consideração pontos geográficos, que serão descritos no próximo capítulo.

4 ARQUITETURA DE DISTRIBUIÇÃO

A distribuição de uma conexão de fibra óptica pode ser Ponto-a-Ponto ou Ponto-a-Multiponto. Entretanto, deve-se considerar que todo enlace que possuir divisões (como um “T”, por exemplo) ou pontos de dobras circulares, deve ser teoricamente evitável. Deste modo, um enlace Ponto-a-Ponto ou P2P (*Point-to-Point*) é composto por pontos onde as perdas de sinais são mínimas. Na prática, as perdas só dependem da distância entre os terminais. Por outro lado, um enlace Ponto-a-Multiponto ou P2MP (*Point-to-Multi-Point*) é composto por pontos onde há derivação do sinal transmitido, nesse caso, perdendo parte do sinal que antes era íntegro.

Por meio dessas arquiteturas, as fibras multimodos e monomodos devem ser alocadas de acordo com a infraestrutura a ser desenvolvida, pois deve se prezar por uma estrutura que mantenha uma conexão óptica com a mínima atenuação possível, mantendo assim, a máxima eficiência para o uso. Os índices de qualidade desejados na rede dependem também das características de fabricação dos cabos de fibra óptica utilizados, bem como da maneira como esses cabos são interconectados (fusão óptica).

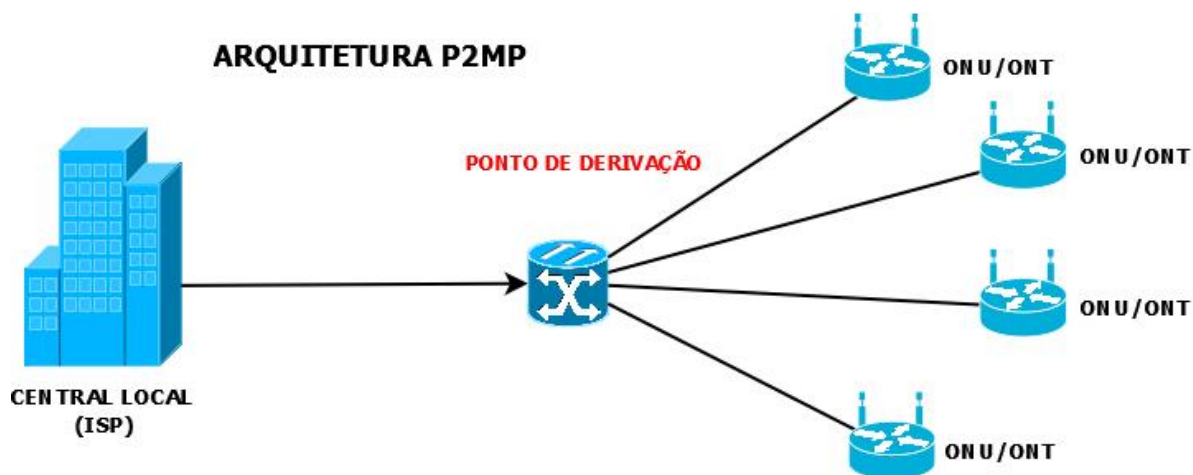
Uma característica física importante é a "bitola" e o material de revestimento. Para termos uma visão mais ampla em relação as arquiteturas, as Figuras 4.1 e 4.2 ilustram as duas arquiteturas discutidas aqui. A arquitetura Ponto-a-Ponto é representada na Figura 4.1. Nela é possível observar que o ponto local da OLT é um centro para distribuição dos enlaces ópticos.



Fonte: (Autor, 2021)

Já a arquitetura Ponto-a-Multi-Ponto é representada na Figura 4.2. Nela, o local da OLT é um ponto para distribuição dos N pontos finais, sendo N o número de pontos onde o nível de potência transmitida se estende até os limites de perda máxima.

Figura 4.2. Arquitetura *Point-to-Multi-Point*.



Fonte: (Autor, 2021)

4.1 Padronização da Estrutura

Para a distribuição entre o provedor e as cidades cornubadas de até 75 km de distância uma das outras, utiliza-se por padrão fibras monomodo sem qualquer tipo de amplificador inserido na rota, isto de fato, dependendo do número de caixas de emenda (CEO) no percurso ou circuitos atenuadores de níveis de potência. Entretanto, a cada 100 km, a fibra precisa ser amplificada pois as perdas por quilometragem já prejudicam o sinal transmitido. Nessas situações, o ruído que está interferindo o sinais pode corromper as informações transmitidas.

“

A transmissão da luz nas fibras ópticas está sujeita às perdas devido a efeitos ópticos. Estes efeitos podem ser lineares e não lineares. Os principais tipos de perdas relativas a efeitos lineares são: atenuação e dispersão. A atenuação refere-se à redução da potência óptica ao longo do comprimento da fibra. Dispersão é a distorção da forma do sinal óptico. Essas perdas são ditas lineares, pois são proporcionais ao comprimento da fibra. A dispersão cromática pode ser corrigida utilizando-se uma fibra de compensação de dispersão. O comprimento desta fibra deve ser proporcional à dispersão. Usualmente, um rolo de fibra de compensação de dispersão de 15 km é

colocado a cada 80 km de fibra de transmissão. No entanto, estas fibras ocasionam uma atenuação de aproximadamente 0,5 dBm/km.

[TRONCO R., AVILA DE F. - 2007]

”

Sobre os princípios básicos da perda em dBm por quilometragem é importante ressaltar que, o sinal precisa chegar entre os terminais possuindo um nível maior que 1 dBm de taxa de transmissão, dependendo do limite que o *transceiver* suporta. Os *receivers* das redes ópticas passivas devem operar entre -10 dBm e -30 dBm de taxa de recepção. Esses valores podem fazer com que tais equipamentos passivos fiquem com perdas em relação aos sinais desgastados que estão recebendo ou com sobrecarga de potência em sinais que possuem níveis de potência elevados, isso é, próximo de zero. Além disso, dependendo da fabricação, alguns desses dispositivos passivos podem nem reconhecer o sinal óptico no seu receptor, fazendo com que o mesmo não se comunique com a rede óptica e seus terminais. Em outras situações, os equipamentos podem ter suas integridades comprometidas devido aos sinais recebidos, indicando que os mesmos foram atenuados no percurso, e que por consequência irá dificultar no processo de leitura destes sinais.

As redes ópticas passivas padronizadas atualmente são PONs multiplexadas por divisão de tempo (TDM - *Time Division Multiplexed*), tipicamente dispostas com topologia em árvore [Campelo, 2010]. Exemplos de PONs TDM são os padrões G-PON (*Gigabit-PON*) [ITU-T, 2008] e XG-PON (*10-Gigabit-PON*) [ITU-T, 2010], nas quais o sinal (*downstream*) transmitido pela terminação de linha óptica (OLT) para as ONUs é multiplexado no tempo. Como há um único receptor na OLT, a transmissão do tráfego de envio (*upstream*) deve ser controlada para que ONUs diferentes não transmitam simultaneamente. Em PONs TDM, sinais de diferentes ONUs compartilham o mesmo comprimento de onda de *upstream* mediante acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA - *Time Division Multiple Access*). [ETHEL B., RAISA O.V, DIVANILSON R. - 2012].

É importante ressaltar que a distribuição dos sinais ópticos deve respeitar todos os parâmetros da rede em que o equipamento é fabricado. Caso contrário, o ISP enfrentará problemas de infraestrutura, o que pode causar muitas falhas. No próximo capítulo, será discutida a dor que um ISP pode enfrentar no caso de um erro ou falha, quando não é considerado os parâmetros e as arquiteturas mencionadas neste capítulo.

5 DORES DA INFRAESTRUTURA

A distribuição das pontos terminais entre cidades ou polos utilizando conexão P2P e entre cidades e seus pontos finais utilizando conexões P2MP deve ser idealizada e projetada levando em consideração tanto os parâmetros que os equipamentos suportam, quanto o custo-benefício da expansão dos pontos de distribuição. Os pontos prejudiciais em decorrência da geografia da área de cobertura ocasionam falhas na leitura e reconhecimento dos sinais, e também são um elemento a ser levado em consideração. Podemos classificar as dores da infraestrutura em:

- Falha na estratégia de distribuição: ocorre quando uma rede atua no limite de potência do *transceiver*, tornando o ponto de distribuição não usual e inutilizável.
- Falha na parametrização ou balanceamento: ocorre quando equipamentos passivos não são detectados e não há comunicação com o ponto terminal devido a não se atingir o nível de potência mínimo para estabelecer o “aperto de mãos” (*handshake*).

Essas falhas exemplificam como um ISP pode ser vulnerável. Esses elementos prejudiciais podem ser evitados, efetuando um levantamento de uma infraestrutura sólida e consistente, respeitando todos os parâmetros que os equipamentos suportam e operam de maneira ideal.

5.1 Análise Equacional

Para a análise matemática, deve-se ressaltar novamente o elemento principal para a construção da equação do nível de potência e também da atenuação incidente. O logaritmo é o elemento que vai construir essa medida, dando a escala decibel, um significado em referência a um resultado negativo ou positivo.

Na fibra óptica ou outro componente passivo de uma rede óptica, com potência de entrada P_{in} e potência de saída P_{out} ($P_{in} > P_{out}$), as perdas em dB são dadas na Figura 5.1 abaixo, e essa potência é referenciada a 1 mW (miliwatt): [PINHEIRO, JOSÉ. 2017]

Figura 5.1. Cálculo de perdas e atenuação em dB.

$$\text{Perdas (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

$$\text{Atenuação (dB)} = -10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

Fonte: (PINHEIRO, JOSÉ. 2017)

Na escala logarítmica de nível de potência, a diferença de sinal transmitido entre uma determinada rede passiva (PON), é definida pela diferença entre a taxa de transmissão e taxa de sensibilidade de recepção daquela designada PON. Por exemplo, se essa diferença for igual a 8 dB, e se o valor da potência recebidas pelas ONUs for maior que esse limite (níveis de potência mais distantes de 0 dBm), é identificado que os equipamentos estão operando em uma taxa de atenuação muito prejudicial a transmissão da rede passiva como um todo. Neste caso, a razão sinal ruído (SNR - *Signal to Noise Ratio*) começa a exibir valores discrepantes e mais próximos de zero, determinando que a introdução de ruído é praticamente máxima no canal.

5.2 Balanceamento de nível de potência

Para melhor identificarmos como deve ser efetuado o balanceamento, será demonstrada a seguinte situação: temos uma determinada PON contendo 20 usuários finais e suas devidas ONUs. A maior potência recebida por essa PON é -20 dBm e a menor potência é -35 dBm, ou seja, a potência de todas as ONUs estão distribuídas nesse intervalo. Entretanto, para fins de adequação e sugestão no projeto de construção da rede, o orçamento de potência não se deve exceder uma diferença de 8 dBm entre o menor e maior nível recebido pela PON. Isso se explica devido a sensibilidade dos equipamentos, que faz com que os mesmos não operem de maneira correta. Em geral a diferença máxima entre os níveis de potência suportados é fornecido pelo fabricante dos aparelhos.

Nesse caso, a potência recebida pela PON está desbalanceada, caracterizando um erro ou falha de balanceamento, pois ao adicionarmos a diferença entre a Tx e Rx da PON de 8,0 dB na maior potência, identificamos que a potência limite para o intervalo dessa PON deveria ser de -28 dBm. Em suma, todas as ONUs dos usuários finais abaixo

desse nível de potência estariam atenuadas como podemos perceber na Tabela 5.1 abaixo.

Tabela 5.1. Exemplo de um relatório de uma PON com o sinal fraco.

ONU	Rx		ONU	Rx	
1	-20.0 dbm	➔	1	-20.0 dbm	}
2	-21.5 dbm		2	-21.5 dbm	
3	-22.2 dbm		3	-22.2 dbm	
4	-22.8 dbm		4	-22.8 dbm	
5	-23.5 dbm		5	-23.5 dbm	
6	-24.1 dbm		6	-24.1 dbm	
7	-24.7 dbm		7	-24.7 dbm	
8	-25.5 dbm		8	-25.5 dbm	
9	-26.7 dbm		9	-26.7 dbm	
10	-26.9 dbm		10	-26.9 dbm	
11	-27.1 dbm		11	-27.1 dbm	
12	-27.6 dbm		12	-27.6 dbm	
13	-28.2 dbm		13	-28.2 dbm	}
14	-28.8 dbm		14	-28.8 dbm	
15	-29.0 dbm		15	-29.0 dbm	
16	-29.9 dbm		16	-29.9 dbm	
17	-31.3 dbm		17	-31.3 dbm	
18	-32.5 dbm		18	-32.5 dbm	
19	-34.1 dbm		19	-34.1 dbm	
20	-35.0 dbm		20	-35.0 dbm	

Elementos dentro do limite da PON

Elementos Atenuados

Fonte: (Autor, 2021)


Em relação a situação acima, é identificado que o problema está na distribuição de potência para a PON. Isso pode ocorrer devido a alguma falha na rota de atendimento, ou até mesmo devido a distância entre CTOs e OLTs, caracterizando uma falha também de estratégia de distribuição. Tais problemas surgem com bastante frequência, principalmente se a rota de passagem da fibra for aérea (podendo ser subterrânea), pois acidentes são mais comuns e se usam muitas vezes CEOs/CSOs.

Podemos também identificar outra situação: temos uma determinada PON contendo 20 usuários finais e suas devidas ONUs, onde a maior potência recebida nessa PON é -12,0 dBm e a menor é -20,0 dBm. As potências de todas as ONUs estão distribuídas nesse intervalo. Ao adicionarmos a diferença entre a Tx e Rx da PON de 8,0 dB na maior potência, identificamos que a potência limite para o intervalo dessa PON deve ser de -20,0 dBm.

Neste cenário, é possível afirmar que a PON está atuando dentro do limite de potência mínimo aceitável para recepção. Entretanto, ela está fora do padrão do limite máximo aceitável. Através do orçamento de potência do projeto, é identificado que sinais mais fortes que -16,0 dBm são prejudiciais as ONUs. Estes sinais causam saturação no *receiver* da ONU, fazendo com que a mesma não consiga ler os feixes de

luz corretamente. Desta forma, é possível identificar que as ONUs recebendo níveis de potência mais forte que -16,0 dBm, estão saturadas devido o sinal forte proveniente da PON, como apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Exemplo de um relatório de uma PON com o sinal forte.

ONU	Rx		ONU	Rx	
1	-12.0 dbm		1	-12.0 dbm	}
2	-12.5 dbm		2	-12.5 dbm	
3	-12.8 dbm		3	-12.8 dbm	
4	-13.2 dbm		4	-13.2 dbm	
5	-13.9 dbm		5	-13.9 dbm	
6	-14.1 dbm		6	-14.1 dbm	
7	-14.7 dbm		7	-14.7 dbm	
8	-14.9 dbm		8	-14.9 dbm	
9	-15.2 dbm		9	-15.2 dbm	
10	-15.4 dbm		10	-15.4 dbm	
11	-15.6 dbm		11	-15.6 dbm	
12	-16.0 dbm	12	-16.0 dbm	}	
13	-16.3 dbm	13	-16.3 dbm		
14	-16.7 dbm	14	-16.7 dbm		
15	-16.9 dbm	15	-16.9 dbm		
16	-17.8 dbm	16	-17.8 dbm		
17	-18.2 dbm	17	-18.2 dbm		
18	-18.7 dbm	18	-18.7 dbm		
19	-19.3 dbm	19	-19.3 dbm		
20	-20.0 dbm	20	-20.0 dbm		

Elementos Saturados

Elementos dentro do limite da PON

Fonte: (Autor, 2021)

Em outra situação temos dispersão dos níveis de potência entre os elementos da PON, na qual uma ONU está recebendo um sinal atenuado. Este sinal pode ter sido atenuado por uma simples falha nos conectores da fibra ou no *receiver* da ONU, ou pelo retorno do sinal comprometido para a OLT. Sendo assim, a ONU com sinal atenuado, atenua os sinais recebidos de todas as outras ONUs que estão conectadas na mesma PON. Isso pode ocorrer de duas formas. Em ambas, a ONU irá introduzir ruído mas com comportamentos diferentes. Na primeira delas haverá uma saturação por sinal forte (disperção no *splitter*), e na segunda haverá enfraquecimento do sinal (atenuação no *splitter*).

O *splitter*, por sua vez, é um divisor de capilaridade da conexão óptica, localizado na CTO, sendo o elemento que divide o sinal advindo da OLT para as redes de acesso, ou seja as ONUs. É a partir dele que ocorre a junção do sinal para transmissão e recepção tanto na direção da OLT (retorno do sinal óptico advindo da ONU), quanto na direção das ONUs (envio do sinal óptico advindo da OLT). Nesse contexto, podemos ter a seguinte situação: temos uma determinada PON contendo 20

clientes, sendo que a maior potência é -14,5 dBm, e a menor potência é -32,0 dBm, e todas as potências das ONUs estão distribuídas nesse intervalo.

Notamos que as duas extremidades do intervalo estão atenuadas entre si. Isso acontece quando uma ou mais ONUs atuam na dispersão do sinal, e outras atuam na atenuação deste sinal, prejudicando todos os elementos da PON. Para identificar quais ONUs estão influenciando nessa dispersão é necessário visualizar a taxa de recepção individual e comparar com a taxa de retorno para a OLT. Todas as ONUs que tiverem suas taxas de recepção individual (ONU Rx) atenuadas estão atuando para atenuação da PON (PON Rx) em conjunto, como mostrado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Exemplo de um relatório de uma PON com sinal com dispersão.

ONU	ONU Rx	PON Rx	ONU	ONU Rx	PON Rx		
1	-15.2 dbm	-14.5 dbm	1	-15.2 dbm	-14.5 dbm	}	
2	-16.4 dbm	-15.1 dbm	2	-16.4 dbm	-15.1 dbm		}
3	-16.9 dbm	-16.3 dbm	3	-16.9 dbm	-16.3 dbm		
4	-17.2 dbm	-17.5 dbm	4	-17.2 dbm	-17.5 dbm		
5	-17.5 dbm	-17.9 dbm	5	-17.5 dbm	-17.9 dbm		
6	-17.6 dbm	-18.5 dbm	6	-17.6 dbm	-18.5 dbm		
7	-18.2 dbm	-19.2 dbm	7	-18.2 dbm	-19.2 dbm		
8	-18.5 dbm	-20.1 dbm	8	-18.5 dbm	-20.1 dbm		
9	-18.7 dbm	-21.4 dbm	9	-18.7 dbm	-21.4 dbm		
10	-19.3 dbm	-22.0 dbm	10	-19.3 dbm	-22.0 dbm		
11	-20.0 dbm	-23.7 dbm	11	-20.0 dbm	-23.7 dbm	}	
12	-21.5 dbm	-24.2 dbm	12	-21.5 dbm	-24.2 dbm		
13	-22.2 dbm	-25.8 dbm	13	-22.2 dbm	-25.8 dbm		
14	-22.8 dbm	-26.5 dbm	14	-22.8 dbm	-26.5 dbm		
15	-23.5 dbm	-27.1 dbm	15	-23.5 dbm	-27.1 dbm		
16	-24.1 dbm	-28.4 dbm	16	-24.1 dbm	-28.4 dbm		
17	-24.7 dbm	-29.6 dbm	17	-24.7 dbm	-29.6 dbm		
18	-25.7 dbm	-30.8 dbm	18	-25.7 dbm	-30.8 dbm		
19	-27.1 dbm	-31.7 dbm	19	-27.1 dbm	-31.7 dbm		
20	-28.4 dbm	-32.0 dbm	20	-28.4 dbm	-32.0 dbm		}

Fonte: (Autor, 2021)

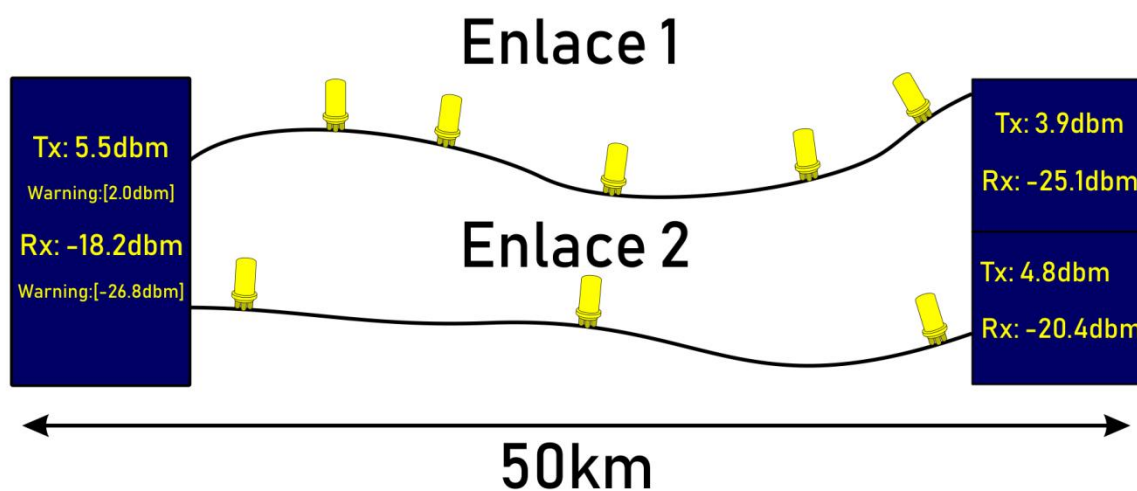
Nesse caso, diferente dos anteriores, identificamos dispersões entre os elementos da PON e se faz necessário uma manutenção de correção de forma individual nas ONUs, pois a falha não se encontra na rota ou rede de atendimento e sim nos elementos que constituem a PON. Respeitando o limite máximo do nível de potência suportado pelos equipamentos, ao adicionarmos a diferença entre a Tx e Rx da PON de 8,0 dB no sinal que deveria ser o mais forte (-16,4 dBm), identificamos que a potência limite para o intervalo dessa PON deve ser em torno de -24,4 dBm e que todo sinal mais forte que -16,4 dBm está contribuindo para a dispersão e atenuação da PON. Em outras palavras, as ONUs 1, 18, 19 e 20 teriam que ser verificadas de forma individual e assim, com a manutenção no local onde estão presentes, a PON não estará sob atenuação e todos os elementos voltarão a ficar no intervalo correto para distribuição, minimizando quaisquer perdas que antes poderiam ocorrer.

5.3 Pontos Disruptores de Sinal

Iremos verificar a partir desse ponto os elementos que deixam as redes passivas (PON) atenuadas entre si e pontos atenuados entre as comunicações dos terminais da fibra óptica. Serão ressaltadas as principais falhas que ocorrem caso hajam erros na infraestrutura de forma singular e como essas falhas podem influenciar na obstrução da comunicação dos terminais (OLT).

Os pontos disruptores de sinal ocorrem com muita frequência em expansões, mas também ocorrem por consequência de uma manutenção emergencial, uma ruptura ou cisão na fibra. A maioria desses pontos enfraquecedores acontecem em situações em que são empregadas um número alto de CEOs ou CSOs, pois essas caixas de emendas contribuem para o enfraquecimento ou atenuação dos sinais ao analisarmos os trechos que elas compõe. Entretanto, as CEOs são de extrema importância para manutenções.

Figura 5.2. Caracterização de Enlaces com CEOs.



Fonte: (Autor, 2021)

Os enlaces na Figura 5.2 representam bem como ocorre a diferença entre a infraestrutura empregada. Nela, os conectores nas pontas possuem uma potência limite dada pela fabricante do *tranceiver* apresentando o nível de potência necessário para operar de maneira correta. Essa potência não pode ser menor 2,0 dBm para transmissão e não pode maior que -26.8 dBm para recepção. Essas informações podem ser identificadas pelo “*Warning*”, no início do enlace. O “*Warning*”, demonstra a potência

limite que o *transceiver* consegue operar no enlace. Ao final do enlace, notamos um caso de atenuação atuando muito próximo a potência limite.

O enlace 1 se caracteriza como uma rota cheia de acidentes não causais, sendo descrita como um local onde foram efetuadas muitas manutenções de emergência em decorrência de rompimentos e que, como consequência, se fez necessário o emprego de CEOs na rede. Já o enlace 2, se caracteriza por uma expansão recentemente empregada, com trechos de fibra subterrânea e com rotas pouco movimentadas, sem muito risco de acidentes. Esses pontos de enfraquecimento do sinal não são os únicos que geram atenuações entre as PONs, pois como já vimos, o próprio balanceamento do nível de potência pode prejudicar o enlace.

Em relação a perda, as CEOs não possuem um valor definido ou padrão de atenuação. Essa é uma informação relativa e depende de muitos fatores também operacionais, como por exemplo, a fusão das fibras dentro dessa caixa de emenda. Uma das primeiras tarefas da infraestrutura é avaliar os valores aceitáveis de perdas de forma a obter um projeto que atenda aos requisitos da rede óptica. Para caracterizar adequadamente esses pontos disruptores, os seguintes parâmetros também devem ser observados:

- Transmissor: potência de saída, temperatura e envelhecimento.
- Receptor: sensibilidade do detector.
- Cabo óptico: efeitos das perdas e da temperatura nas fibras.
- Conexões de fibra: *splitters*, conectores e emendas.
- Outros: margens de tolerância para os cabos e demais elementos passivos, prevenindo os efeitos do tempo e fatores ambientais, degradação das emendas etc. [PINHEIRO, JOSÉ. 2017].

5.4 Manutenção de nível de potência

As manutenções dos níveis de potência são realizadas para manter e preservar a rede estável, e em todas elas, é necessário efetuar o balanceamento do enlace. Essas manutenções ocorrem de maneira corretiva, mesmo quando a infraestrutura não consegue identificar o que pode acontecer na rede de atendimento. Além disso, elas ocorrem de acordo com a necessidade, como uma manutenção de expansão, ou emergencial como uma cisão acidental.

As intervenções no enlace podem ocorrer de duas formas: a primeira forma é uma manutenção de equilíbrio de potência, se for identificado que o enlace está com

uma potência muito elevada para os equipamentos operarem de maneira correta. Já a segunda forma é uma manutenção de compensação, se for identificado que o enlace está atenuado de forma que o nível de potência esteja muito fraco para a comunicação.

As manutenções na rede serão realizadas para efetuar correções na rede de atendimento, e se o erro estiver no balanceamento do P2P ou do P2MP, é necessário o uso de amplificadores ópticos para compensar a perda que ocorre. Essas intervenções também respeitam um limiar de parâmetros dos elementos da rede óptica, como por exemplo, os mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Valores de referência para alguns componentes ópticos.

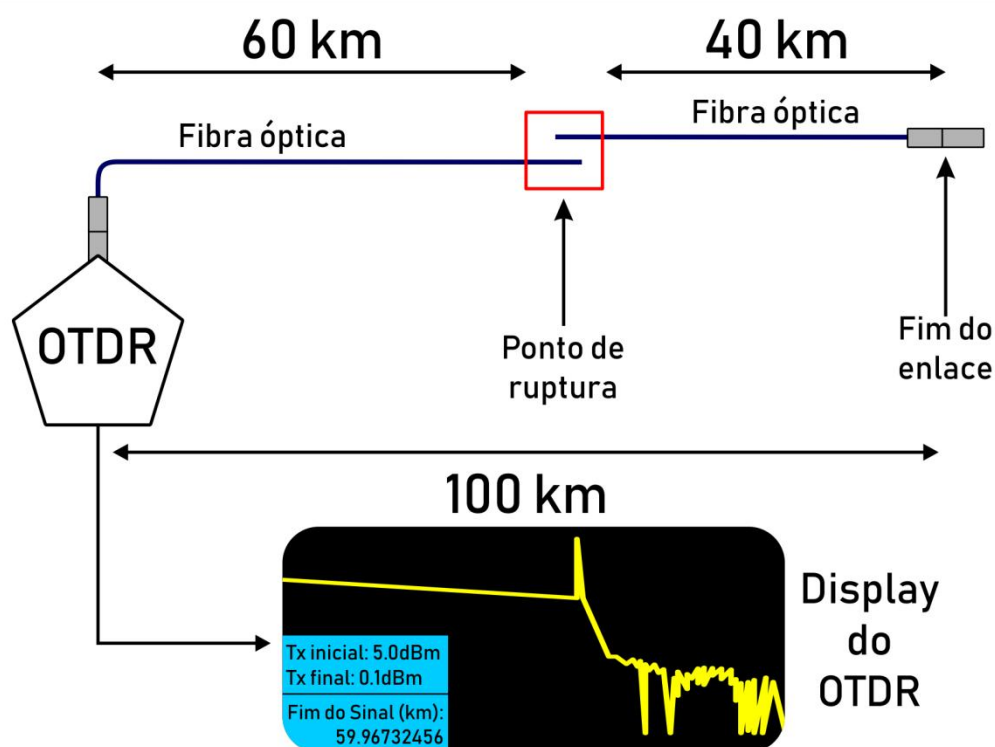
Componente	Parâmetro	Valor de referência
Fibra monomodo	1.550 nm	0,20 dB/km
Fibra monomodo	1.310 nm	0,35 dB/km
Fibra multimodo	1.300 nm	1,0 dB/km
Fibra multimodo	850 nm	3,0 dB/km
Emenda por fusão	Cada emenda	0,1 dB
Emenda mecânica	Cada emenda	0,5 dB
Conector	O par	0,75 dB

Fonte: (PINHEIRO, JOSÉ. 2017)

Um dos elementos importantes para efetuar as manutenções e também projetar toda a rede de estrutura óptica é o reflectômetro óptico no domínio do tempo, chamado de OTDR (*Optical Time-Domain Reflectometer*), representado de forma abstrata na Figura 5.3. Além de verificar a qualidade do sinal no enlace entre longas distâncias, ele pode também medir o comprimento da fibra que ele está lendo. Com este dispositivo, é possível identificar exatamente onde está o ponto de atenuação, ou o trecho onde a fibra foi rompida, por exemplo.

Em relação ao funcionamento, o aparelho incide uma luz teste identificando até onde o sinal alcança, e tendo como o referência o tempo que isso leva, retorna a distância percorrida pelo pulso até o sinal se perder totalmente ou encontrar um destino.

Figura 5.3. Exemplo de aplicação e visualização abstrata de um OTDR.



Fonte: (Autor, 2021)

Um OTDR contém um laser de diodo, um detector de fotodiodo e um circuito de temporização de alta precisão. O laser emite um pulso de luz em um comprimento de onda específico, esse pulso de luz viaja ao longo da fibra para testá-la, conforme o pulso viaja pela fibra, a luz transmitida as porções da fibra é refletida/refratada ou espalhada de volta pela fibra para o fotodetector do OTDR. A intensidade dessa luz que retorna e o tempo que leva para chegar de volta ao detector nos informa o valor da perda, o tipo e localização de um evento no link de fibra. [FERREIRA, JOAQUIM, 2020].

Se necessário, amplificadores ópticos com semicondutores ou fibras dopadas podem ser usados para compensação do nível de potência. No entanto, este procedimento não é recomendado pois muito ruído é introduzido para compensar a perda, que depende diretamente da distância da fibra de compensação. Muitos dos amplificadores, convertem o sinal óptico em sinal elétrico, a partir da conversão o sinal era amplificado e compensado, assim então ao final era reconvertido novamente para sinal elétrico, inserindo ruído no canal e sendo de alto custo para implementação.

“

Existem diferentes tecnologias para amplificar as fibras ópticas, porém, quando falamos em ter o menor número de pontos no enlace para alcançar grandes distâncias e altas capacidades, a solução mais eficaz em termos técnicos/econômicos é o DWDM, sigla em inglês que significa Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Densa.

[CEBALLOS, GUILLERMO, 2022].

”

Entretanto, caso seja necessário amplificar o sinal para manter e conservar o balanceamento da infraestrutura e melhorar a eficiência das arquiteturas P2P e P2MP, a técnica de transmissão por multiplexação por divisão de densos comprimentos de onda é a tecnologia ideal. O DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) permite a transmissão de múltiplos sinais de dados usando diferentes comprimentos de onda da luz através de um único núcleo de fibra óptica. Esses sinais ópticos são associados a diferentes frequências dentro de uma determinada banda de frequência, e a capacidade de transmissão da fibra é aumentada quando esses sinais são multiplexados em uma única fibra.

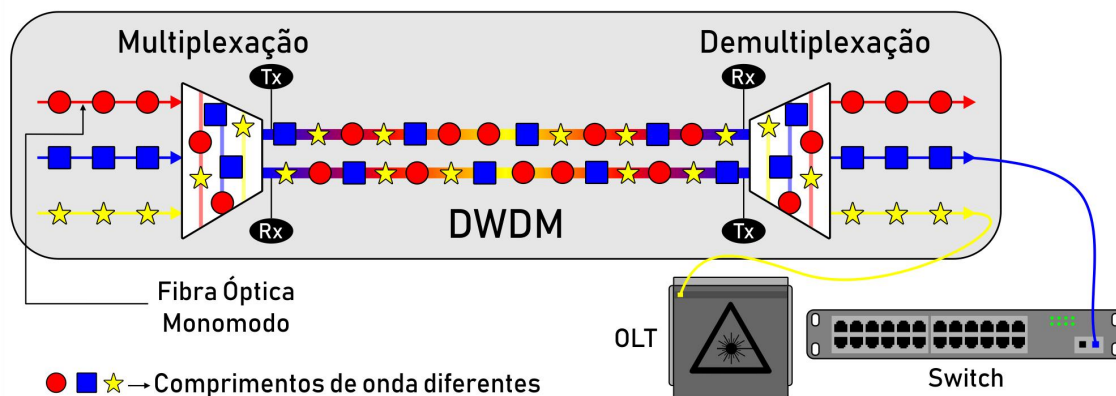
“

A multiplexação do tipo DWDM apresenta espaçamentos de canais mais densos que podem variar de 1,6nm até 0,2nm. Isso permite a multiplexação de uma quantidade de canais muito alta, podendo transmitir mais de 128 canais em um único par de fibras. A tecnologia permite uma capacidade de transmissão por canal de até 100Gb/s e pode chegar a centenas de quilômetros.

[SALVADORI, GUILHERME, 2019].

”

Figura 5.4. Demonstração abstrata do funcionamento da técnica DWDM.



Fonte: (Autor, 2021)

Essa técnica de transmissão, representado de forma abstrata na Figura 5.4, é útil para distribuição em redes ópticas de grande porte com enlaces complexos, mas o custo de aquisição para se montar uma estrutura para se utilizar deste método pode ser uma barreira para os ISPs. Nesse caso, o posicionamento estratégico do ponto onde a técnica será aplicada na infraestrutura de links é fundamental para se ter uma rede estável e rentável.

A técnica para atuar no enlace, necessita estar com conjunto de multiplexadores em pares, pois a multiplexação de um lado A deve ser tratada da mesma forma (demultiplexada) em outro lado B. O método DWDM possui conversores de comprimento de onda para que a diferença entre eles se torne uma faixa intervalar, que possibilita o reuso de comprimentos de onda no sistema, elevando a eficiência do protocolo de internet através da fibra óptica em níveis muito superiores do que a transmissão padrão. Determinaremos melhor como usar o posicionamento do ponto em que a técnica pode ser aplicada, descrito no próximo capítulo para construir uma infraestrutura sólida e eficiente.

6 MAPEAMENTO ESTRATÉGICO

Em uma estrutura de enlaces, o mapeamento dos componentes em suas respectivas áreas de atuação é um dos elementos principais para o processo de projeto de todo conteúdo da rede. Todas as características devem ser documentadas, e isso ocorre para que a infraestrutura possa ser adaptada para uma evolução ou revisão.

Se algum dispositivo tiver sua integridade comprometida, os componentes que estão funcionais devem compensar essa deficiência. Por outro lado, a infraestrutura deve viabilizar uma substituição instantânea do dispositivo. A abordagem a ser utilizada é a parametrização de conteúdo simples. Após essa análise será apresentado um modelo de arquitetura da infraestrutura para que tenhamos uma consistência concreta e pontos nocivos mínimos. A partir do modelo apresentado, será mais fácil determinar como manipular todas as estruturas da rede em conjunto, para obter um resultado eficiente.

6.1 Especificações de conteúdo da rede

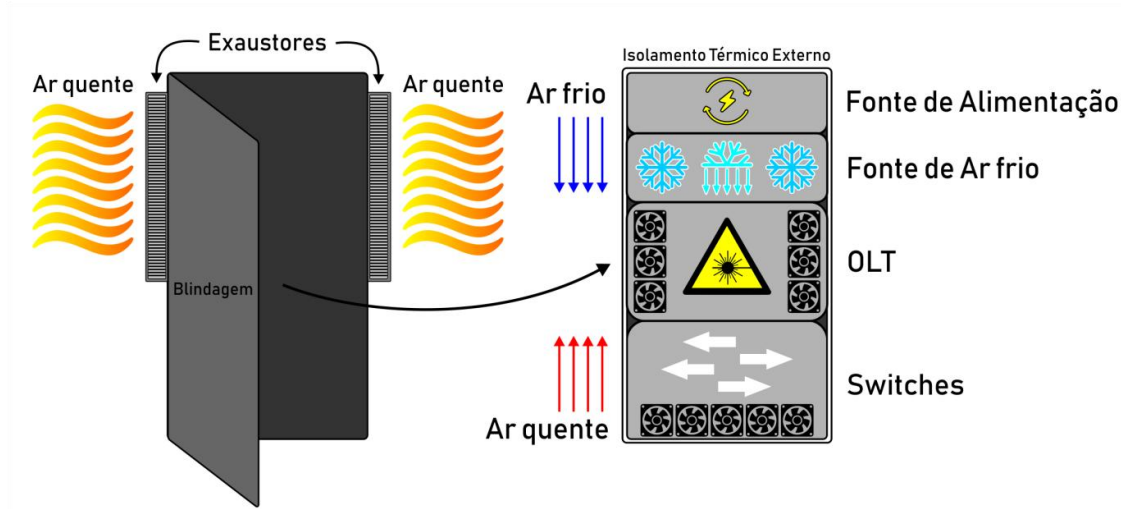
Para que possamos realizar um mapeamento eficiente, o primeiro passo da projeção é caracterizar as especificações do conteúdo rede. Nessa perspectiva é analisada a ocupação dos equipamentos no ambiente de “abrigo” (mais conhecido como *Shelter*), e a maioria dos aspectos físicos devem ser levados em consideração, como temperatura, humidade, alimentação elétrica de operação e entre outros. Os dispositivos que compõe os equipamentos possuem um intervalo de temperatura no qual operam corretamente. Caso esse intervalo não seja respeitado, os dispositivos ficam sobrecarregados. O mesmo ocorre quando os níveis e potência usados para alimentação dos dispositivos também não são respeitados.

A análise desta subseção auxiliará na construção de uma estrutura robusta a partir dos elementos básicos de uma rede P2P ou P2MP. O foco será os gabinetes que abrigam as terminações das fibras. Basicamente, o abrigo do terminal precisa ser resfriado para manter a temperatura de operação do aparelho dentro da faixa limite. É importante notar que a temperatura é proporcional ao número de aparelhos que o abrigo comporta. O calor dissipado pelo exaustor de um dispositivo deve ser considerado, pois quanto mais energia o dispositivo é alimentado, mais calor o dispositivo dissipa entre seus ventiladores (*FANs*).

Entre os componentes bases de um abrigo, estão o terminal de fibra (OLT), *switchers* para permuta e controle de âncoras de fibra (*link*), banco de baterias, sistema

de resfriamento e termostato. Para o uso de uma energia restauradora (*backup*) com o uso do banco de baterias, é necessário o uso de relés com automação, pois quando o circuito identificar que a alimentação padrão não está sendo energizada, o sistema deve fechar a chave do circuito com as baterias com o menor atraso possível (*delay*). Além disso, é recomendado o uso de um padrão de energia com no mínimo uma tensão 220 volts (tensão/voltagem), pois alguns terminais operam em até 3 fases utilizando uma tensão de 290 volts para alimentação dos equipamentos, com o uso de filtro de linha com baixa tolerância as variações (*ripple*).

Figura 6.1. Exemplo de um “abrigo” de terminal e reorganização.



Fonte: (Autor, 2021)

Devido ao fato do ar frio ser mais denso que o ar quente, o fluxo de calor acumulado é no sentido de baixo para cima, como segue a orientação da Figura 6.1. Com isso, é necessário que os equipamentos que emitem mais calor, fiquem na parte de mediana ou baixa, ficando abaixo do sistema de resfriamento, para que o ar frio desça e resfrie os equipamentos e o ar quente por ser menos denso suba e saia por um exaustor do abrigo.

Contudo, é necessário também se atentar para a blindagem do abrigo devido a incidência de descargas elétricas. Tais descargas podem prejudicar a alimentação dos equipamentos já que podem ocasionar picos de tensão e corrente. Entretanto, é viável apontar que entre o abrigo e o local da instalação, haja a presença de resfriadores e exaustores que mantenham o equilíbrio fora da blindagem e do isolamento térmico. Isso

deve ocorrer para que não haja diferença entre as temperaturas ou humidade, dificultando a troca do fluxo de ar que é expelido do abrigo para fora do ambiente.

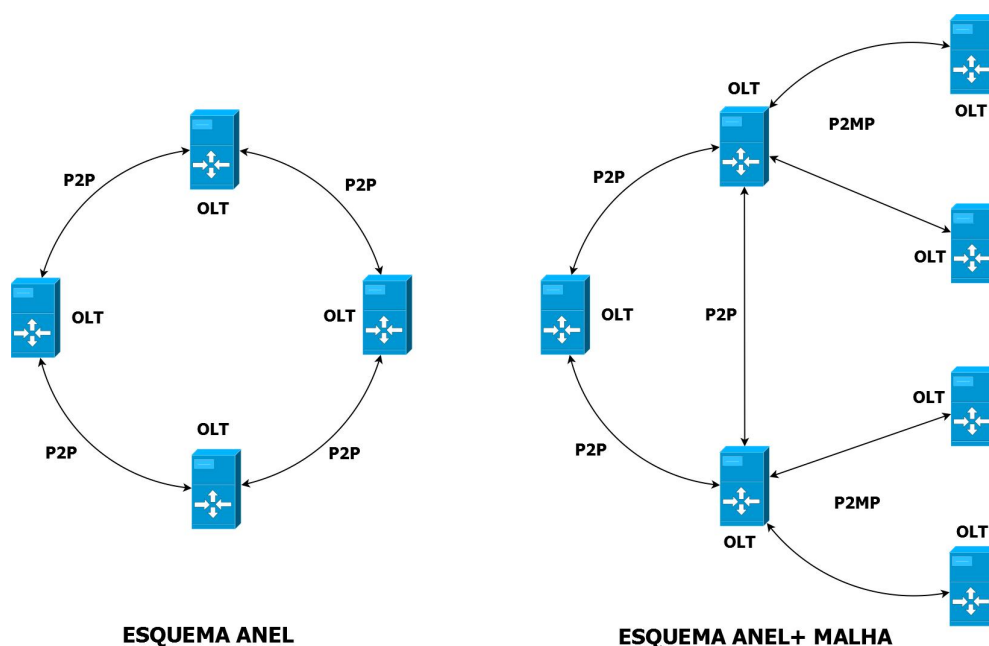
6.2 Esquemas de enlace

Idealmente, os pontos de decaimento do enlace devem obedecer ao esquema em anel para que a comunicação não seja dividida tantas vezes na medida que esses pontos crescem. Os pontos de derivação têm seus pontos positivos e negativos e por isso devem ser utilizados de forma inteligente e eficiente, principalmente quando se trata de pontos de comutação de tráfego entre ISPs. No entanto, em algumas situações a derivação ainda é necessária para formar um esquema do tipo ramificado, que também é conhecido como esquema em malha

O modelo de composição do enlace é caracterizado pela dependência ou necessidade de conexão entre os pontos. Em algumas situações não possível estabelecer uma conexão direta. Esta conexão por sua vez terá que derivar de um ponto já existente no esquema para que a comunicação seja possível. Dessa forma, um enlace P2P baseado no esquema em anel, se torna um P2MP baseado em malha para que a comunicação se torne viável.

Para identificarmos o motivo da importância de caracterizar os esquemas, devemos nos atentar ao princípio que quanto mais pontos de derivações maior será a perda e desgaste do sinal no enlace. Entretanto, uma infraestrutura escalar que necessita de constantes expansão, depende desses pontos de derivações, tornando necessária a projeção uma rede de mesclada. Abaixo, na Figura 6.2, podemos identificar os dois principais esquemas utilizados para arquitetura da rede óptica: o esquema em Anel e o esquema em Malha com Anel.

Figura 6.2. Esquemas de uma arquitetura de rede óptica.



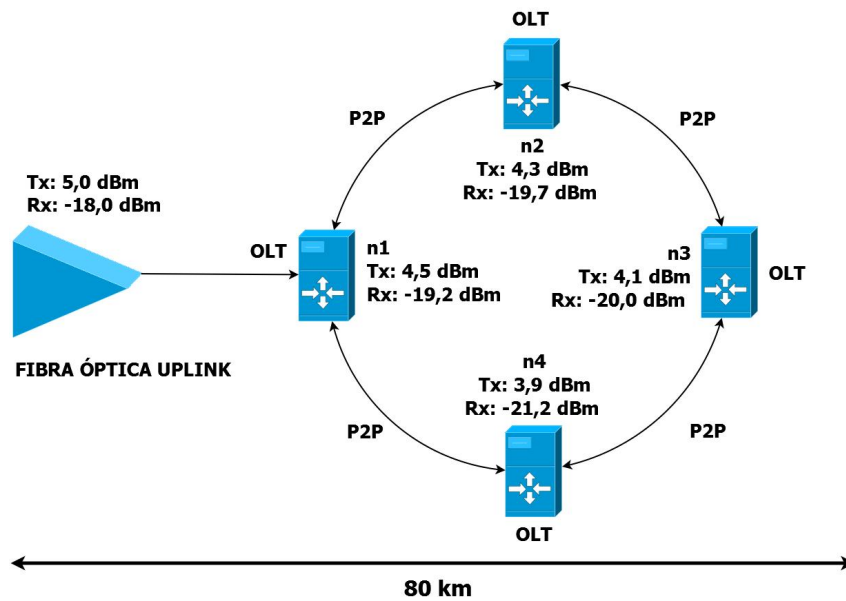
Fonte: (Autor, 2021)

No esquema em anel temos a atenuação mínima, ocorrendo somente as perdas em relação a distância e as pequenas perdas entres os terminais e suas extremidades. Já no esquema com conexões do tipo malha, as conexões P2MP sofrem mais atenuações em relação as conexões P2P. Além das perdas já citadas, é levado em consideração as fusões de cada derivação que será conectada. Em teoria, a atenuação na topologia em anel seria de 1 para N, e a 1 para N², sendo N o número de derivações, que influenciará diretamente no nível de potência.

6.3 Análise Paramétrica

A atenuação em relação aos esquemas será explicada utilizando métodos matemáticos simples e de fácil entendimento. Quando é apontado que a topologia em anel é 1 para N, significa que a atenuação só está entre os pontos terminais do enlace e a distância total, e isso pode ser facilmente identificado quando N é uma variável que define o número de derivações. Em uma conexão P2P, N é o número de terminais no enlace sendo uma conexão 1 para 1 em cada ponto, apresentando um perda uniforme demonstrada na Figura 6.3 abaixo.

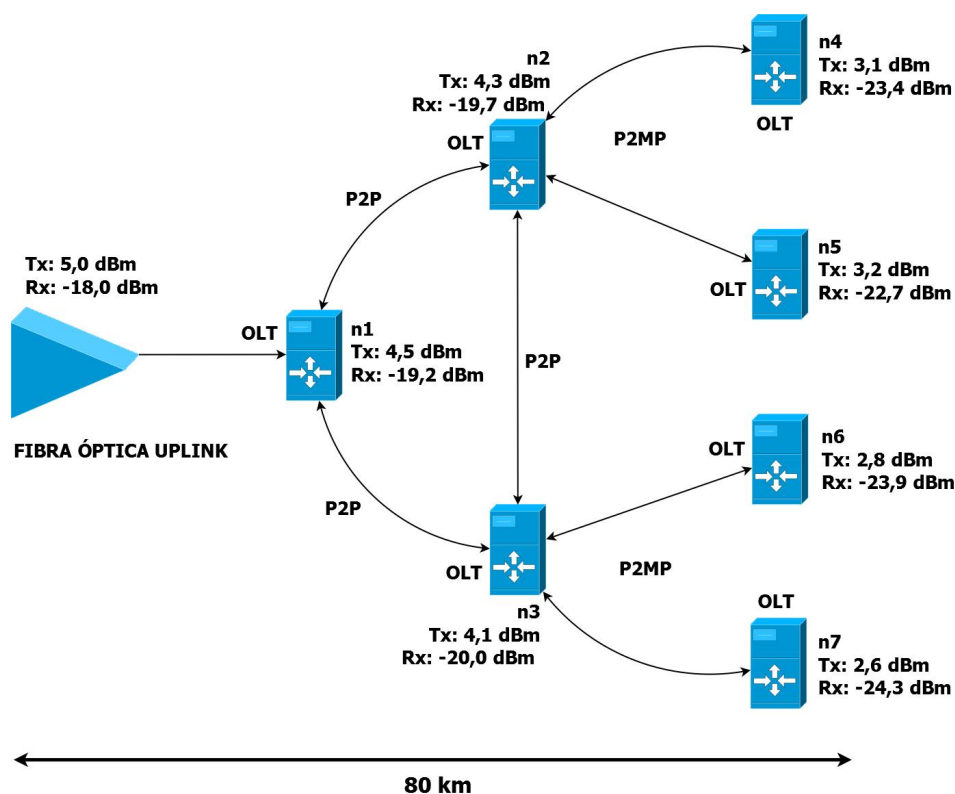
Figura 6.3. Exemplo da perda de nível de potência no esquema em anel.



Fonte: (Autor, 2021)

Já em relação a atenuação nos esquemas que contém malha, é apontado que a conexão é de 1, sendo um ponto inicial ativo de conexão com a rede (*uplink*) para o enlace, e as derivações seriam N & N (N and N). Desta forma, os pontos seriam levantados de forma simultânea e o módulo da conexão de 1 até um ponto de derivação seria 1/2. No próximo ponto o valor seria 1/4. Esses números indicam que a perda é proporcional ao quadrado do nível de derivação e mostram quanto de perda pode haver em conexões P2MP. A Figura 6.4 abaixo, apresenta um exemplo simples de como pode ser identificado a perda nesse esquema.

Figura 6.4. Exemplo da perda de nível de potência no esquema em malha.



Fonte: (Autor, 2021)

Em ambas as situações a perda paramétrica é identificada e deve ser considerada ao projetar a infraestrutura da rede, já que a mesma é fundamental para a consistência do enlace óptico. Portanto, é fácil visualizar que, em alguns pontos, a perda pode ser uniforme (esquema em anel) e a composição de pontos de derivação podem gerar perdas variáveis (inserção de malhas no esquema em anel). A partir dessas arquiteturas, será implementado na próxima Subseção um esquema que mescla topologias para criação de enlaces complexos.

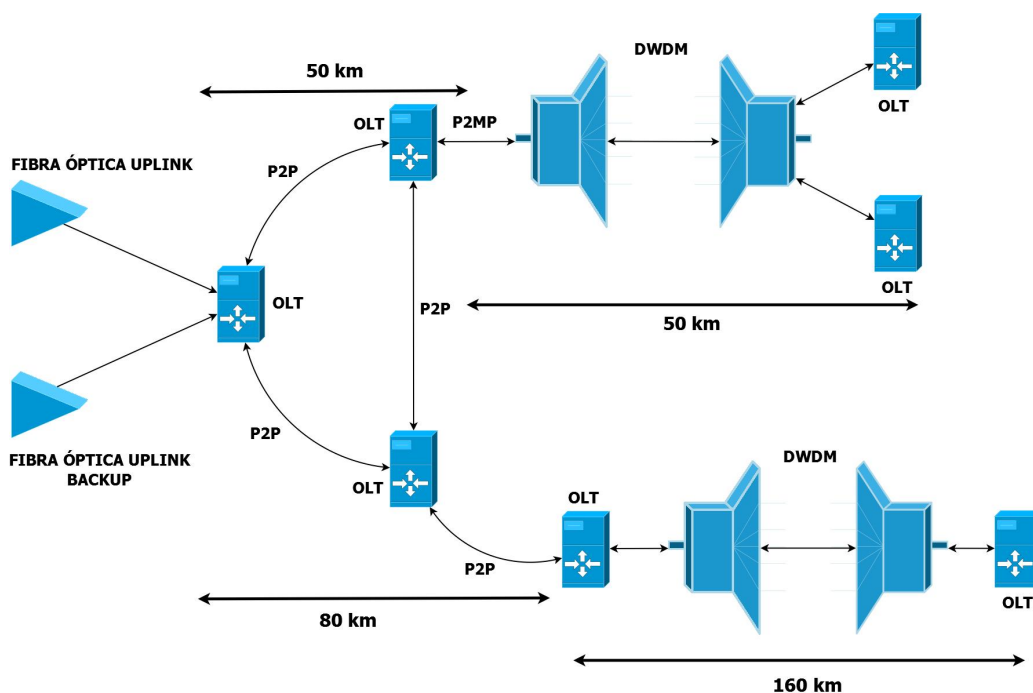
6.4 Esquemas de mescla

A arquitetura utilizada para projeto e construção de uma rede ideal será uma mescla do que há de melhor nos circuitos de esquemas em anel e em malha, definindo também o posicionamento de P2P e P2MP no enlace. O formato será em pontos de compensação nas áreas onde ocorrem as maiores perdas em relação à distância e por pontos de derivação. Nesses pontos o nível de potência deverá ser compensado por amplificadores ópticos (para fins ideais será utilizado a técnica DWDM). Os seguintes parâmetros serão obedecidos para que haja uma boa prática na construção da infraestrutura do enlace:

- Posicionar a técnica de transmissão DWDM nos pontos em que o enlace exceda uma distância de 100 km e onde houver pontos de derivação entre um dos terminais;
- Projetar a rede com conexões *uplink* restauradoras (*backup*) para que o circuito não fique saturado ou fique sem comunicação quando houver incidentes;
- Para sugestão e exemplo do orçamento de potência de um projeto, pode-se manter o nível de potência de transmissão Tx entre os terminais com a diferença de no máximo 3,0 dBm para mais ou menos forte, e o nível de potência de recepção Rx entre os terminais com a diferença de no máximo 8,0 dBm para mais ou menos forte.
- Dividir de maneira uniforme a capacidade de conexões *uplink* para que, quando um circuito estiver inoperante os outros não sejam saturados pela quantidade de tráfego da rede.

Em referência as boas práticas, abaixo na Figura 6.5, podemos identificar melhor um enlace arquitetado de forma ideal, obedecendo cada parâmetro de boa prática, e apresentado a qualidade da comunicação.

Figura 6.5. Esquema ideal com mesclas na arquitetura do enlace.



Fonte:(Autor, 2021)

O limiar de potência entre os terminais na figura acima, está estável entre todos os pontos terminais com um intervalo (*range*) de potência de transmissão e recepção respeitando os parâmetros de boas práticas com alta eficiência e recursividade limpa. Toda a descrição apresentada nos capítulos anteriores foi levada em consideração e está contida no enlace acima, porém foi abstraída.

Além disso, é importante ressaltar que o enlace projetado pelo mapeamento possui a finalidade de entregar até 1 gigabit por segundo nos equipamentos finais com sua consistência. Podemos destacar também a presença da fibra de *backup*, possibilitando isolar uma parte do enlace para efetuar intervenções. Dessa forma a rede opera por outra rota física de comunicação, prevenindo que os terminais fiquem sem comunicação. Isto pode ocorrer mesmo que a fibra seja de baixa capacidade, desde que o horário, em relação a carga do fluxo de dados favoreça essa permutação que irá compensar a ausência do *uplink* principal.

Com essas medidas e práticas recomendadas, uma arquitetura de rede consistente e confiável pode ser criada para distribuir conexões de internet por fibra. No entanto, é desta forma que se constrói e projeta cadeia de enlaces que integram a rede mundial de computadores, permitindo assim a utilização de ligações de alta capacidade, possibilitando a migração e integração de diversos serviços através da rede.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo descrever e fundamentar como ocorrem as conexões entre usuários e provedores de internet por meio de cabos de fibra óptica em redes de fibra óptica passivas. Os capítulos iniciais descreveram as principais características construtivas dos cabos de fibra óptica e sua composição, bem como os elementos (equipamentos) que compõe a rede óptica. Os capítulos intermediários deram ênfase na análise do nível de potência dos sinais transmitidos e recebidos em enlaces de redes de fibra óptica. Já os capítulos finais concentraram-se em análises e mapeamentos dos componentes da rede buscando uma arquitetura sólida, isto é, onde todos os equipamentos funcionam dentro dos limites estabelecidos pelos fabricantes, levando a uma rede estável e com mínimos pontos de erros.

As análises discutidas aqui tiveram como base os elementos físicos da rede, os elementos lógicos, tais como a padronização dos enlaces e projeções, além das conexões entre as linhas. Durante todo o processo, os pontos críticos foram citados. Dentre eles destaca-se a prevenção e correção da atenuação dos sinais, sendo este o maior obstáculo para criação de uma rede de fibra óptica passiva consistente. Essa atenuação, por ser um elemento importante, incide em alterar a forma de estruturação da rede, sendo necessário remodelar os enlaces para diminuir perdas, ou até mesmo para compensá-las.

O conteúdo do trabalho buscou embasar métodos e fornecer soluções a partir das melhores características que modelos e sistemas constituídos de elementos ópticos podem oferecer. Dentre o modelo de interconexão (OSI), as camadas 1 e 2, ou seja, física e enlace de dados, foram mais exploradas para buscar o máximo de eficiência. Em suma, os resultados obtidos e discutidos neste trabalho foram consequência da busca por estabelecer enlaces de redes ópticas eficientes com grande capacidade de transmissão e poucos erros associados. Dessa forma, é possível dispor esse conhecimento de forma desmitificada, além de estimular e incentivar a progressão desse conteúdo em trabalhos futuros, como o desenvolvimento de novos modelos de enlace e integrações de novas tecnologias.

8 REFERÊNCIAS

10GTEK. “**10GBase-T SFP+ Transceiver**”. 2016. 5 f. Produto. Amazon. Disponível em: <https://www.amazon.com/10Gtek-SFP-10G-T-S-Compatible-10GBase-T-Transceiver/dp/B01KFBFL16?th=1>. Acesso em 25 de maio de 2022.

ALMEIDA, Carlos E. L. “**IP Sobre DWDM**”. 2021. 14 f. Artigo. Grupo de Teleinformática, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/grad/01_2/IP%20sobre%20DWDM%20-%20HTML/intro.htm. Acesso em 11 out. 2021.

BARROS, Waleska B. P.; ALBUQUERQUE, Marcelo P. & Márcio P. “**Introdução a Fibras Ópticas**”. 2010. 24 f. Nota técnica. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2010. Disponível em: http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/nt01103.2010_10_06_11_31_02.pdf. Acesso em 20 out. 2021.

BLACK BOX. “**Cabos de fibra óptica multimodo versus monomodo**”. 2021. 3 f. Notícia. Black Box. Disponível em: <https://www.blackbox.com.br/pt-br/page/28536/Recursos/Suporte-Tecnico/black-box-explica/Fibre-Optic-Cable/Cabos-de-fibra-optica-multimodo-versus-monomodo>. Acesso: Acesso em: 19 out. 2021.

CAMACHO, Adriano. “**Netflix registra queda acentuada no número de novos assinantes**”. 2021. 2 f. Notícia - Artigo. Techmundo. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/cultura-geek/215969-netflix-registra-queda-acentuada-numero-novos-assinantes.htm>. Acesso em: 22 out. 2021.

CEBALLOS, Guillermo. “**O que é DWDM?**”. 2022. 4 f. InterNexa. Artigo. Disponível em: <https://www.internexa.com/pt/blogs/conectividade/o-que-e-dwdm/>. Acesso em 19 de junho de 2022.

CÉSAR, Amílcar C. “**Guia Dielétrico: Fibra Óptica**”. 2016. 50 f. Apresentação, SEL310/612 Ondas Eletromagnéticas. Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP, 2016. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2655489/mod_folder/content/0/Guia%20diel%C3%A9trico/fibra%20optica.pdf. Acesso em: 20 out. 2021.

CISCO. “**Entendendo níveis de transmissão e recepção nos modems**”. 2007. 3 f.

Notícia. Cisco. ID do documento:15380. Disponível em:

https://www.cisco.com/c/pt_br/support/docs/dial-access/asynchronous-connections/15380-trans-rec-15380.html. Acesso em: 30 nov. 2021.

COELHO, Diogo; MARCIANO, Pablo; COELHO, Thiago; SEGATTO, Marcelo;

PONTES, Maria J. “**Entrelaçamento em Frequência para 50 Gb/s e 100 Gb/s DWDM-PON**”. 2019. 4 f. Artigo. XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/340803116_Entrelacamento_em_Frequencia_para_50_Gbs_e_100_Gbs_DWDM-PON . Acesso em: 11 out. 2021.

ELETRO NET. “**O que é e para que serve o OTDR**”. 2020. 6 f. Notícia. Eletro Net.

Disponível em: <https://www.eletronet.com/o-que-e-e-para-que-serve-o-otdr/>. Acesso em 29 nov. 2021.

ELIAS, Glêdson; LOBATO, Luiz C. “**Arquitetura e Protocolos de Rede TCP-IP**”.

2013. 418 f. Livro 2ª edição. Escola Superior de Redes, Rio de Janeiro: RNP/ESR, 2013. ISBN 978-85-63630-18-6, Bibliografia: p. 393-395.

FERREIRA, Rafael J. L.; SILVA, Guilherme E. V. “**Análise da Rede Óptica Passiva Baseada em Multiplexação por Divisão no Tempo como alternativa para acesso banda larga no cenário brasileiro**”. 2011. 12 f. Artigo. Faculdade das Atividades

Empresariais de Teresina (FAETE), Teresina, 2011. Disponível em:

<https://docplayer.com.br/5347483-Analise-da-rede-optica-passiva-baseada-em-multiplexacao-por-divisao-no-tempo-como-alternativa-para-acesso-banda-larga-no-cenario-brasileiro.html> .Acesso em: 11 out. 2021.

GONDIM, Ethel B.; HIRAFUJI, Raísa O. C.; CAMPELO, Divanilson R. “**Eficiência Energética em Redes XG-PON: Conservação de Potência em ONUs**”. 2016. 14 f.

Artigo, II Workshop de Redes de Acesso em Banda Larga. Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <http://docplayer.com.br/14622023-Eficiencia-energetica-em-redes-opticas-passivas-de-proxima.html>. Acesso em: 11 out. 2021.

HALLIDAY, David ; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. “**Fundamentos de Física**”.

2016. 448 f. Livro 9ª Edição. ISBN 8521630387. Editora LTC.

HELERBROCK, Rafael. "**Fibra óptica**"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/fibra-optica.htm>. Acesso em 21 out. 2021.

IMCTEC. "**100Gb/s ME-QSFP28 PSM4 2km Optical Transceiver**". Inter medium communication technology CO., LTD. 2003 . 1 f. Artigo. Disponível em: <http://imctec.net/100gbs-meqsf28-psm4-2km-optical-transceiver.html>. Acesso em 25 de maio de 2022.

ISCTE. "**Amplificadores Ópticos: Aspectos gerais**". 2018. 7 f. Apresentação. Disponível em: <https://docplayer.com.br/67927767-Amplificadores-opticos-aspectos-gerais.html>. Acesso em 06 nov. 2021.

MATA, Amanda. "**O que é Fibra Óptica e como funciona?**". 2011. 12 f. Notícia. Oficina da Net. Disponível em: <https://www.oficinadanet.com.br/artigo/redes/o-que-e-fibra-optica-e-como-funciona>. Acesso em 19 out. 2021.

PASSOS, Joel V. "**Introdução ao estudo de fibra óptica**". 1985. 12 f. i. Artigo. R. Militar de Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 1985. Disponível em: http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_1_tri_1985/introd_estudo_fibras_oticas.pdf. Acesso em 20 out. 2021.

PINHEIRO, José M. S. "**Redes Ópticas de Acesso em Telecomunicações**". 2017. 445 f. Livro 1ª Edição. ISBN 978-85-352-8612-0. Elsevier Editora Ltda, Rio de Janeiro, 2017.

PIRES, João. "**Redes de Acesso Ópticas: Seminário sobre Redes Ópticas de Nova Geração**". 2009. 43 f. Apresentação. Instituto de Telecomunicações, DEEC, Instituto Superior Técnico, ISCTE, Lisboa, 2009. Disponível em: http://home.iscte-iul.pt/~rhcl/material/NGON/NGON_JPires.pdf. Acesso em 06 nov. 2021.

PODER 360. "**Netflix tem menor número de novos assinantes desde 2015**". 2022. 4 f. Poder 360. Notícia. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/midia/netflix-tem-menor-numero-de-novos-assinantes-desde-2015/>. Acesso em 25 de maio de 2022.

RODRIGUES, Vanir L. "**Curso de Fibra Óptica**". 2016. 60 f. Apresentação. Disponível em: <https://docplayer.com.br/1475601-Curso-de-fibra-optica.html> . Acesso em: 30 out. 2021.

- SALVADORI, Guilherme. “**Amplie a capacidade do seu link óptico de forma prática**”. 2019. 5 f. Datacom. Artigo. Disponível em: <https://www.datacom.com.br/pt/blog/28/amplie-a-capacidade-do-seu-link-optico-de-forma-pratica>. Acesso em 19 de junho de 2022.
- SANTOS, Ivan. “**Apostila Atualizada de Fibra óptica FTTH FTTX GPON**”. 2016. 153 f. Apresentação. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/WellingtonMartins21/apostila-atualizada-de-fibra-ptica-ftth-fttx-gpon>. Acesso em: 20 out. 2021.
- SILVEIRA, Fernando L. “**Escala de nível de potência (escala dBmW)**”. 2013. 1f. Resposta. Disponível em: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=escala-de-nivel-de-potencia-escala-dbmw>. Acesso em: Acesso em: 20 out. 2021.
- TAKEUTI, Paulo. “**Projeto e Dimensionamento de Redes Ópticas Passivas**”. Orientador: Murilo Araujo Romero 2005. 88 f. TCC (Mestrado) - Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-22092005-205226/pt-br.php> . Acesso em: 20 out. 2021.
- TANENBAUM, Andrew S.; WETHERALL, David. “**Redes de Computadores**”. 2011. 600 f. Livro 5ª Edição, ISBN-10 857605924X. Editora Pearson, 2011.
- THUNDER LINK. “**How Can We View the TX and RX Power of the Optical Module?**”. 2021. 15 f. Artigo. Thunder Link. Disponível em: <https://www.thunder-link.com/blog/how-can-we-view-the-tx-and-rx-power-of-the-optical-module/>. Acesso em 20 out. 2021.
- TRONCO, Tania R.; AVILA, Luis F. “**Fundamentos de Comunicações Ópticas**”. 2007. 77 f. Livro 1ª Edição. Licença livre para estudo.