UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

PABLLO ARRUDA SOARES

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA PROJETOS EM REDES ÓPTICAS PASSIVAS (PON)

Palhoça

2020

PABLLO ARRUDA SOARES

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA PROJETOS EM REDES ÓPTICAS PASSIVAS (PON)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Djan de Almeida do Rosário, Esp.

Palhoça

2020

PABLLO ARRUDA SOARES

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA PROJETOS EM REDES ÓPTICAS PASSIVAS (PON)

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 25 de novembro de 2020.

Professor e orientador Djan de Almeida do Rosário, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Fábio Ignacio da Rosa, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Fernando Effting da Silva, Ms.
Fruitkeep

Dedico este trabalho à minha família ...

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Djan do Rosário por acolher e me guiar neste trabalho de conclusão de curso e ter toda paciência e atenção.

A UNISUL por ser um centro de excelência e fornecer todo o aparato necessário à formação de um engenheiro eletricista, com laboratórios e salas de aula bem estruturadas.

Agradeço a minha esposa Kamilla e ao meu filho Arthur, por entenderem um pouco da minha ausência nessa trajetória.

A toda minha família que me incentivou por toda essa jornada e em especial minha mãe, **Elza Arruda**, que sem o seu amparo esta seria uma missão impossível.

“A luz não é só aquilo que a gente enxerga, a luz é realmente o elemento básico de toda a nossa existência” Vanderlei Salvador Bagnato, Dr., Professor de Física Óptica UNIVESP

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso se dedicou ao desenvolvimento de uma proposta metodológica através do estudo e análise para projetos físicos de redes de fibra óptica passiva (PON). Foi aplicada tal proposta para uma determinada região, específica em tecnologia GPON (*Gigabit Passive Optical Network*). Fora apresentado seus princípios físicos de funcionamento, elementos que atenuam ou limitam o seu alcance e desempenho além de especificações técnicas até a fase de pré-projeto. A depender da quantidade de assinantes ou de sua respectiva distribuição demográfica, foram elaborados dois tipos de projetos de redes PON: uma com parâmetro de potência balanceada (*splitters* com mesmo nível de potência) e outra desbalanceada (*splitters* com saída não uniforme de intensidade de sinal). Foram comparados seus custos para análise de viabilidade econômica, justificado os custos necessários para construção de uma infraestrutura de rede com baixo número de intervenções corretivas ao longo do tempo e que mantenha um bom desempenho.

Palavras-chave: Projeto de Rede GPON, Rede Balanceada, Rede Desbalanceada, Fibra-óptica, Orçamento de potência.

ABSTRACT

This course conclusion work was dedicated to the development of a methodological proposal through the study and analysis for physical projects of passive fiber optic networks (PON). Such proposal was applied for a specific region, specific in GPON technology (Gigabit Passive Optical Network). Its physical principles of operation had been presented, elements that attenuate or limit its reach and performance in addition to technical specifications up to the pre-project phase. Depending on the number of subscribers or their respective demographic distribution, two types of PON network projects were developed: one with a balanced power parameter (splitters with the same power level) and another unbalanced (splitters with non-uniform output of signal strength). Their costs for economic feasibility analysis were compared, justifying the costs necessary for building a network infrastructure with a low number of corrective interventions over time and maintaining a good performance.

Keywords: GPON Network Design, Balanced Network, Unbalanced Network, Fiber-optics, Power budget.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tráfego mensal agregado no ponto de troca em SP até maio de 2020 13
Figura 2 - Tráfego mensal agregado no ponto de troca em SP até maio de 2020 14
Figura 3 - Refração e reflexão entre dois meios. 17
Figura 4 - Reflexão interna total da luz..... 18
Figura 5 - Confinamento da luz dentro da fibra-óptica, NA e ângulo de incidência..... 19
Figura 6 - Luz solar incidindo sobre uma região da atmosfera 21
Figura 7 - Efeito MIE pôr do sol no horizonte 21
Figura 8 - Dispersão da luz no núcleo da fibra óptica. 23
Figura 9 - Comparação entre fibra óptica de baixa atenuação e zero por pico de OH^- 25
Figura 10 - Macro curvatura em um cabo óptico. 29
Figura 11 - Perdas por microcurvaturas..... 29
Figura 12- Quadro *Upstream* e *Downstream* do formato especificado para GPON 31
Figura 13 - Atenuação em dB/km em razão do comprimento de onda na fibra-óptica 31
Figura 14 - Comprimentos de onda de uplink e downlink na rede GPON 35
Figura 15 - Splitter 1:2 desbalanceado..... 36
Figura 16 – Tipos de conectores mais utilizados em redes de fibra ópticas 40
Figura 17 - Topologia básica de uma rede PON 41
Figura 18 - Topologias Anel e Árvore..... 42
Figura 19 – Mapa e lançamento da fibra 12FO..... 44
Figura 20 - Vista da rua..... 45
Figura 21 - Caminho dos dois enlaces físicos 46
Figura 22 - Caminho da F.O..... 47
Figura 23 - Caminho da rede óptica em área rural 49
Figura 24 – Vista aérea do enlace desbalanceado 50
Figura 25 – Posicionamento CTOs 01 a 07..... 50
Figura 26 - Distância entre os enlaces desbalanceados CTOs 01 a 07. 51
Figura 27 - Distância entre os enlaces desbalanceados CTO 07 até final..... 51
Figura 28 - Caminho do cabo de 12 fibras ópticas da rede desbalanceada..... 54
Figura 29 - Planilha Excel com valores calculados de atenuação CTO-01. 55
Figura 30 - Custo primário da rede balanceada..... 57
Figura 31 - Custo primário da rede desbalanceada..... 57

LISTA DE TERMOS E SIGLAS

ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
C.O.	Caixa óptica
CEO	Caixa de emenda óptica
CTO	Caixa de terminação óptica
Downlink	Conexão de recepção
F.O.	Fibra óptica
Gb/s	Gigabits por segundo
in loco	No lugar
ISP	*Internet Service Provider*, Provedor de acesso à internet
ITU-T	*ITU Telecommunication Standardization Sector*, Setor de Normatização das Telecomunicações
Loose	Solto
NA	*Numerical Aperture*, Abertura numérica
OLT	*Optical line termination*, Terminal de linha óptica
ONT	*Optical network terminal*, Terminal de rede ótica
PON	*Passive optical network*, Rede óptica passiva
Powermeter	Equipamento de aferição de potência óptica
SFP	*Small form-factor pluggable transceiver*, Transceptor óptico em formato pequeno e conectorizável
Splitter	Divisor óptico
TDM	*Time Division Multiplexing*, Multiplexação por divisão de tempo
TDMA	*Time Division Multiple Access*, Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo
Uplink	Conexão de envio
WPA	*Water Peak Attenuation*, Fibra de baixa atenuação no pico de água
ZWP	*Zero Wavelenght Dispersion*, Fibra de modo único de dispersão zero

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Banda larga fixa por grupo e tecnologia. 15
Tabela 2 - Especificação ITU-T G652D 27
Tabela 3 - Valores de referência para atenuação *splitters*. 36
Tabela 4 - Sensibilidade dos módulos transceivers dos equipamentos GPON. 37
Tabela 5 – Valores de referência para atenuação de componentes passivos. 39
Tabela 6 - Atenuação típica nos conectores. 40
Tabela 7- Sinal esperado da CTO no comissionamento da rede balanceada 48
Tabela 8 - Comprimento dos enlaces 48
Tabela 9 - Distância entre os enlances desbalanceados. 52
Tabela 10 - Atenuação óptica para splitter desbalanceado. 52
Tabela 11 - Sinal esperado da CTO no comissionamento da rede desbalanceada 56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 A FIBRA ÓPTICA 14
1.2 OBJETIVO GERAL 15
1.2.1 Objetivos específicos 15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 16
2.1 HISTÓRICO 16
2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA FIBRA ÓPTICA 17
2.2.1 Lei da refração (lei de Snell) e ângulo crítico 17
2.2.2 Abertura numérica ou ângulo de aceitação 19
2.3 ATENUAÇÕES EM FIBRAS ÓPTICAS 19
2.3.1 Espalhamento 19
2.4 DISPERSÃO 22
2.4.1 Dispersão modal 23
2.4.2 Dispersão cromática 23
2.5 ABSORÇÃO 24
2.5.1 Absorção por defeitos estruturais 25
2.5.2 Absorção Intrínseca 25
2.5.3 Absorção extrínseca 25
2.5.4 Absorção total 28
2.6 PERDAS POR CURVATURAS 28
2.6.1 Macrocurvaturas 28
2.6.2 Microcurvaturas 29
2.7 CONCEITO OPERACIONAL DES REDES PON 30
2.8 TAXA DE PENETRAÇÃO DA REDE 33
2.9 ARQUITETURA BÁSICA DE UMA REDE PON 35
2.10 ORÇAMENTO DE POTÊNCIA 37
2.11 ORÇAMENTO DE PERDA ÓPTICA E TIPOS DE CONECTORES 39
3 DESENVOLVIMENTO 41
3.1 TOPOLOGIA BÁSICA 41
3.2 METODOLOGIA PARA PROJETO EM REDES ÓPTICAS 42
3.3 REDE BALANCEADA 44

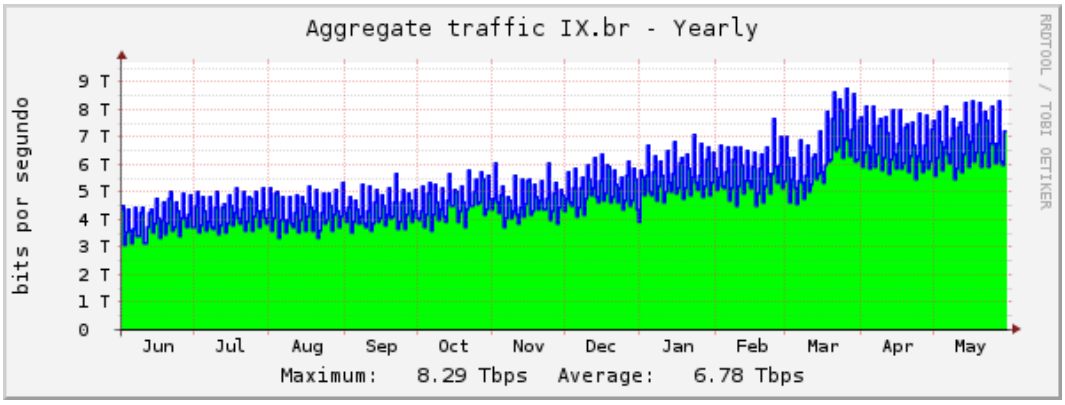
3.3.1 Orçamento de potência 46
3.3 REDE DESBALANCEADA 49
3.3.1 Orçamento de potência 53
3.4 ANÁLISE DE CUSTOS 57
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 59
REFERÊNCIAS 60
APÊNDICE A — PLANILHA EXCEL PARA REDE DESBALANCEADA 62

1 INTRODUÇÃO

O tráfego da internet no Brasil vem aumentando, segundo dados públicos do ponto de troca IX.br (antigo PPT.br). Embora o consumo tenha mostrado uma curva quase indistinta entre dias de semana e finais de semana, os dados de consumo anual mostra um claro crescimento desde o período de quarentena causado pela covid-19, Figuras 1 e 2. A demanda por serviços de internet vem aumentado nos últimos anos devido a oferta de vários serviços na rede. O crescente número de videoconferências e uma maior demanda por serviços de *streaming* de filmes, comércio eletrônico, serviços públicos, ensino e informação acarretando um maior tráfego na Internet. (TELETIME, 2020).

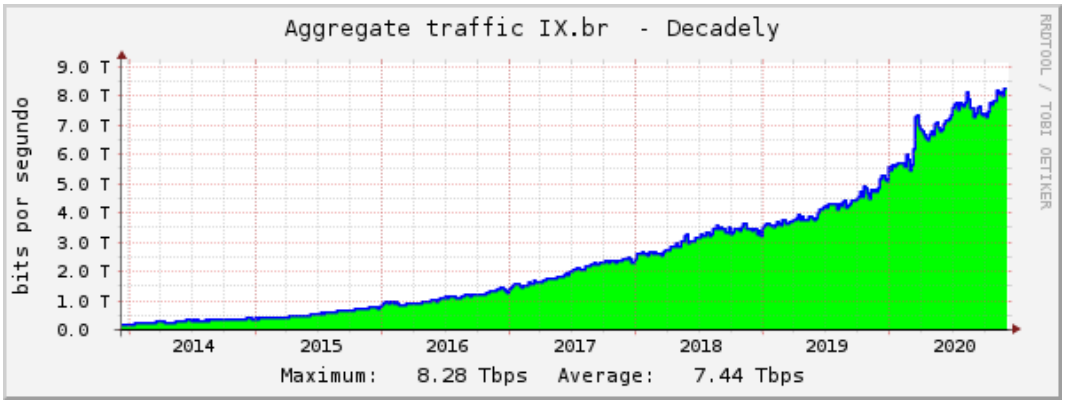
Com isso banda larga no Brasil, majoritariamente entregue em uma tecnologia baseada no par metálico ou coaxial — relatório ANATEL março-2020 — não consegue suportar uma entrega de banda estável, de baixa latência e *jitter*, livre de interferência eletromagnética e compatível com toda essa expansão. Além do mais, segundo dados da Abrint (Associação Brasileira de Provedores de Internet e Telecomunicações), pequenos provedores de acesso à internet, também conhecidos como Prestadoras de Telecomunicações de Pequeno porte (PPPs), são responsáveis por 60% do mercado de fibra óptica, solução que simplifica a estrutura de rede de um modo geral sem a necessidade de elementos ativos para a entrega do *link* ao assinante. (TELETIME, 2020).

Figura 1 - Tráfego mensal agregado no ponto de troca em SP até maio de 2020



Fonte: https://ix.br/agregado/ (maio 2020).

Figura 2 - Tráfego mensal agregado no ponto de troca em SP até maio de 2020



Fonte: https://ix.br/agregado/ (maio 2020).

Dada essa nova era, com uma expansão de redes ópticas, este trabalho teve como pretensão nortear uma construção básica de uma rede de fibra óptica, necessária para estimar o que é realmente imprescindível para o funcionamento da PON, justificando os custos necessários para termos uma rede com baixo número de intervenções corretivas ao longo do tempo e um bom desempenho.

1.1 A FIBRA ÓPTICA

A fibra óptica é um guia de onda para a luz caracterizado por baixas perdas, imune aos ruídos eletromagnéticos e possui grande largura de banda. Possuem elevado grau de pureza, com o núcleo possuindo um índice de refração maior que o da casa que o circunda. Podem ser classificadas como monomodo ou multimodo, sua distinção está pela relação diâmetro do núcleo/casca. A fibra óptica monomodo contém um núcleo que vai de 3 a 8 μm, sendo necessária uma elevada precisão mecânica para o acoplamento. Já fibras multimodo, possuem núcleos de 50 a 62,5 μm.

A adoção da fibra óptica *PON* até a última milha, conhecida como soluções FTTx, sendo essa última letra do acrônimo reservada para os subtipos: FTTH (*fiber-to-the-home*), FTTA (*fiber-to-the-apartment*) ou FTTB (*fiber-to-the-building)*, está presente em 34% das residências que possuem planos de banda larga fixa — Tabela 1.

Tabela 1 - Banda larga fixa por grupo e tecnologia.

Banda larga fixa

BANDA LARGA FIXA, POR GRUPO E TECNOLOGIA

Grupo / Tecnologia	Acessos	Cabos Metálicos	Cabo Coaxial	Fibra Ótica
CLARO	9.680.615	77.144	9.257.893	320.928
VIVO	6.857.135	4.089.621	0	2.767.514
OI	5.048.377	3.752.168	0	1.266.345
OUTROS	11.412.729	1.524.974	381.425	6.974.915
TOTAL	**32.998.856**	**9.443.907**	**9.639.318**	**11.329.702**
PERCENTUAL	**100,00%**	**28,62%**	**29,21%**	**34,33%**

Fonte: Anatel.br (2020)

Segunda o padrão ITU-T G984.1 – março 2008, esta tecnologia é contemplada por uma alta capacidade e largura banda, sendo a fibra óptica, com somente um módulo *SFP* (*Small Form-factor Pluggable*), entregar *links* para até 128 terminais ONT (*Optical Network Termination*, 2.4 Gb/s de *downlink* e 1.2 Gb/s de *uplink* na geração atual, com uma ordem de atenuação muitas vezes menor de qualquer tecnologia em cabos metálicos.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma proposta de organização metodológica para projetos de redes ópticas passivas (PON). Serão descritos os principais passos para a execução de um projeto PON garantindo performance, documentação e viabilidade econômica.

1.2.1 Objetivos específicos

- Criar um projeto seguindo normas técnicas.
- Demonstrar o cálculo de perdas esperadas por todo o percurso da rede.
- Definir um mínimo de energia no terminal PON.
- Elaborar um modelo para redes FTTx residencial.
- Compor uma estratégia viável para a implantação do projeto PON através da análise de custo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICO

O homem há muito tempo se utiliza das fontes de luz existentes na natureza com a finalidade de se estabelecer comunicação à distância. No século XVIII, um sistema de telecomunicações idealizado pelo engenheiro francês Claude Chappe, o *Sémaphore* era base num dispositivo de braços mecânicos, o qual, instalado no alto de uma torre era operado manualmente, e permitia a transmissão de sinais codificados para transmissão de longas distâncias para quem o pudesse ver. (PINHEIRO, 2017).

Já em 1870, John Tyndall, um físico inglês, realizou experimentos que mostrava ser possível guiar a luz num fluxo de água, baseando-se no princípio da reflexão total da luz. Utilizando-se de um recipiente com um furo, um balde com água e uma fonte de luz como o sol, o fluxo de água que saía era iluminado pela luz do sol. Esse experimento não teve aplicação alguma na época mais veio à tona o interesse por outros estudiosos da área dando continuidade à pesquisas (PINHEIRO, 2017).

Em 1880, Alexander Graham Bell apresentou e patenteou um sistema óptico para se utilizar na telefonia. Ele o batizou como *Photophone.* O aparelho recebia a luz do sol que era refletida por um espelho e o mesmo vibrava na frequência da voz, chegava até um dispositivo baseado numa vareta de selênio, cuja resistência variava de acordo com a intensidade da luz que atingia sua superfície. Essa vareta era conectada em uma cápsula receptora alimentada por uma bateria e esse aparato tecnológico da época reproduzia a voz humana. Na época se atingia até 200 metros, porém não funcionava sem a luz solar direta, limitando sua aplicação a somente em dias ensolarados e sem nuvens, bastava chover, ter neblina ou neve e o equipamento não funcionava mais. Por essa limitação, Bell acabou por desenvolver o telefone (PINHEIRO, 2017).

Em 1953, o pesquisador indiano Narinder Singh Kapany desenvolveu fibras de vidro com revestimento e introduziu ao mundo o termo “fibra óptica” (KEISER, 2014).

O desenvolvimento dos sistemas de telecomunicações e a invenção do *laser* em 1960 tornou possível a fabricação da primeira fibra óptica em 1970, abrindo espaço para a exploração do intervalo eletromagnético compreendido entre 770nm a 1675nm para se transmitir informação, região de menor perda em fibras baseadas em sílica. O seu avanço técnico se deu quando pesquisadores da *Corning* demonstraram a viabilidade da produção de

uma fibra de vidro com uma perda de potência óptica baixa o suficiente para uma transmissão (Keiser, 2014).

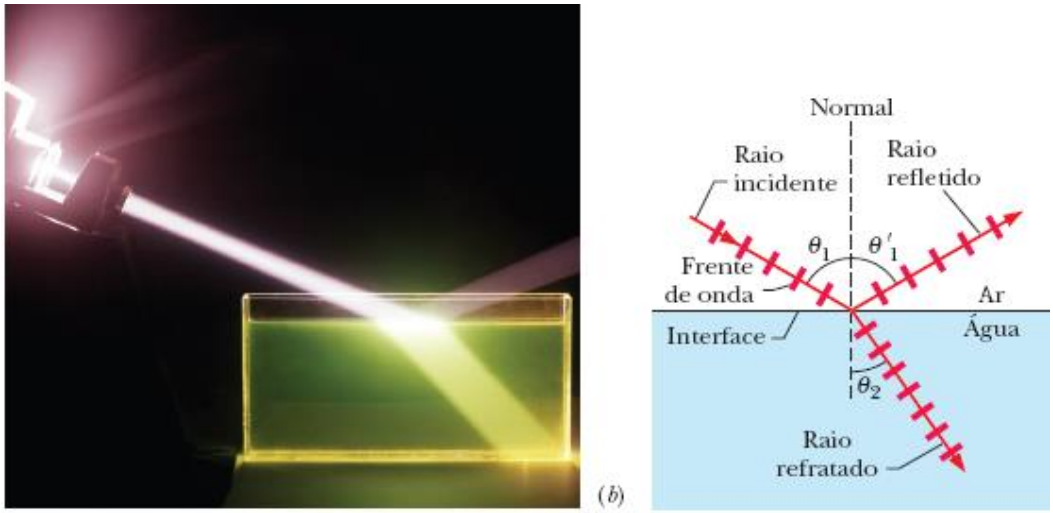
As primeiras conexões de fibra ópticas apareceram no final da década de 1970 e foram utilizadas para transmitir sinais de telefonia a uma taxa de aproximadamente 6 *megabits* por segundo em distâncias em torno de 10km. Com a evolução e pesquisa, a sofisticação e a capacidade desses sistemas aumentaram exponencialmente e em menos de 10 anos já havia conexões de transporte de dados agregados a taxas além de *terabits* por segundo e em distâncias de centenas de quilômetros (Keiser, 2014).

2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA FIBRA ÓPTICA

2.2.1 Lei da refração (lei de Snell) e ângulo crítico

A da refração (lei de Snell) afirma que a relação entre o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refração é igual à relação entre as velocidades de propagação da onda nos dois meios respectivos. Isso é igual a uma constante, que representa a relação entre o índice de refração do segundo meio e do primeiro. O funcionamento da fibra óptica está baseado em dois fenômenos: a reflexão e a refração da luz, Figura 3. (HALLIDAY, 2018).

Figura 3 - Refração e reflexão entre dois meios.



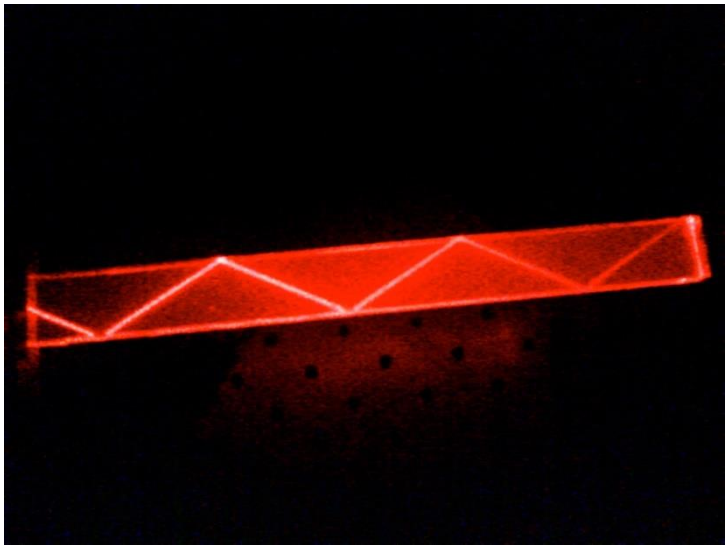
Fonte: Fundamentos de física, vol 4: óptica e física moderna, p. 20, 2018, Halliday e Resnick.

No ângulo crítico, a luz é refletida de volta a superfície e permanece dentro do meio mais denso, ver Figura 4, quanto maior for este ângulo maior a probabilidade de que uma porção

maior do sinal de luz enviado ao longo da fibra seja refratada para fora do material de transmissão. Abaixo temos a Lei de Sneel representada pela Equação (1):

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2) \quad (1)$$

Figura 4 - Reflexão interna total da luz



Fonte: SIYAVULA (2020).

Para conseguirmos casar estes dois princípios, temos que propagar nosso pulso luminoso num meio com índice de refração maior que o meio externo de contato. Além do mais temos que garantir que o sinal não atinja um ângulo limite estabelecido por esta relação do índice de refração entre os materiais, obtido pela resolução da equação definindo como ângulo de refração em 90 graus. Assim garantimos que a luz irradiada por um dispositivo fototransmissor seja guiado tendo sucessivas reflexões até a chegada de um fotodetector na outra ponta caso seja acoplada até este ângulo limite. Veja um exemplo numérico:

nc(núcleo) = 1,55

n(casca)= 1,48

n0(ar)= 1

$$n_c * \sin(\theta_c) = n * \sin(\theta_2)$$

$$1{,}55 * \sin(\theta_c) = 1{,}48 * \sin(90°)$$

$$\arcsin(\theta_c) = \frac{1{,}48}{1{,}55} = 0.95$$

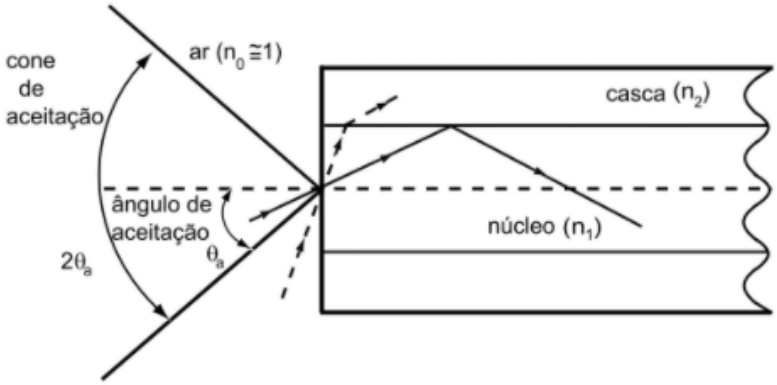
$$\theta_c = 73°$$

2.2.2 Abertura numérica ou ângulo de aceitação

Qualquer emissão de luz dentro desse material que em seu cone de aceitação (*Numerical Aperture* – NA), definido pela Equação (2) abaixo, atinja até este determinado ângulo de admissão, neste caso numérico será de ± 27º em relação ao centro, será transmitido até o outro lado sem sofrer refração ou dispersão de energia por ter que atravessar o material em uma direção estranha ao caminho da propagação (Figura 5). (HALLIDAY, 2018)

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_0^2} = n_0 * \sin(\theta_i) \tag{2}$$

Figura 5 - Confinamento da luz dentro da fibra-óptica, NA e ângulo de incidência



Fonte: Fundamentos de física, vol 4: óptica e física moderna, 10ª ed., p.140, 2018, Halliday e Resnick.

2.3 ATENUAÇÕES EM FIBRAS ÓPTICAS

A fibra óptica é um elemento que apresenta atenuação de modo progressivo à medida do aumento da distância da fonte emissora, os principais são: espalhamento, dispersão, absorção e perdas por curvatura. (PINHEIRO, 2017).

2.3.1 Espalhamento

Perdas por espalhamento ocorrem quando parte da energia luminosa que está se propagando ao longo da fibra óptica, é convertida em modos e/ou comprimentos de onda que não propagam bem pela fibra. (HALLIDAY, 2018).

De uma forma geral, para diferenciar o espalhamento da dispersão, o espalhamento ocorre quando a luz escapa do núcleo e vai parar na casca, já a dispersão é um efeito similar, porém é diferenciado por ocorrer somente no núcleo da fibra, será abordado um pouco mais adiante. O espalhamento é causado por imperfeições na construção da fibra (dimensões inferiores ao comprimento de onda da luz) e se caracteriza pelo desvio da luz por várias direções. Geralmente a luz convertida em outros modos de propagação. O espalhamento representa o menor limite de atenuação de uma fibra, é inversamente proporcional a quarta potência do comprimento de onda. Existem quatro tipos de espalhamento: Rayleigh, Mie, Brillouin e Raman. Sendo os dois primeiros (Rayleigh e Mie) sistemas lineares de espalhamento provocados pela transferência de potência de um modo guiado para modos vazados ou irradiados. Já os dois restantes, Brillouin e Raman, são efeitos não lineares que resultam na transferência de potência luminosa de um modo guiado para si mesmo, ou para outros modos em um comprimento de onda diferente. Segundo PINHEIRO (2017, p.48), esses efeitos são, geralmente, significativos apenas em fibras monomodo.

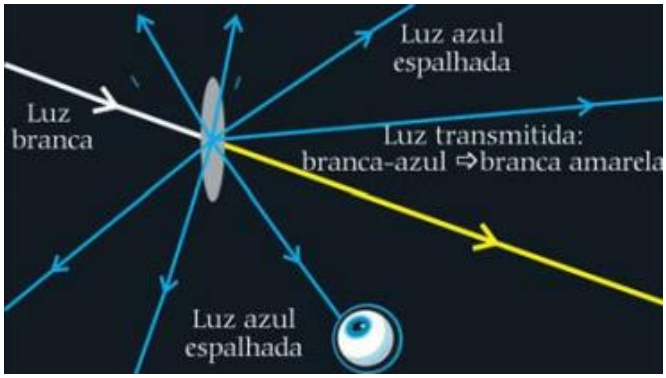
2.3.1.1 Rayleigh

Espalhamento causado por não-homogeneidades aleatórias do índice de refração da fibra óptica. Para o espalhamento Rayleigh essas não-homogeneidades são muito menores que o comprimento de onda da luz, enquanto o espalhamento Mie envolve não-homogeneidades cujas dimensões são comparáveis (ou maiores) que o comprimento de onda. (HALLIDAY, 2018).

Este efeito originado microscopicamente é evidenciado na composição e na densidade do material, pode se manifestar de forma mais intensa em comprimentos de ondas menores que 800nm. A densidade da potência luminosa é decrescida a cada interação da onda da luz de mesma ordem de grandeza com a estrutura molecular do material. É por esse motivo que não se adota comprimentos de onda inferiores a 800nm. O *OTDR* (reflectômetro de domínio do tempo) pode testar o cabo óptico e verificar se ocorre em grande escala essa atenuação. Para λ=1550nm a atenuação esperada é de 0,12 a 0,16 dB/Km. (PINHEIRO, 2017)

Exemplificando este efeito temos o caso de “Porquê o céu é azul?”, Figura 6, pois o comprimento de onda azul (450nm) é espalhado por 3 vezes mais que o comprimento de onda vermelho (600nm).

Figura 6 - Luz solar incidindo sobre uma região da atmosfera



Fonte: Física na Escola, v. 9, n. 2, 2008, SILVEIRA, Fernando.

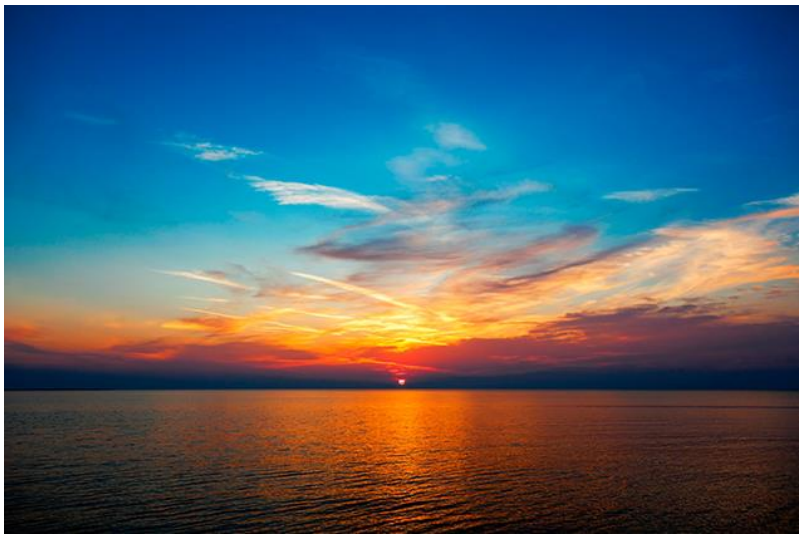
2.3.1.2 MIE

Efeito complementar ao Rayleigh, é onde o feixe luminoso é espalhado por partículas cujos raios alcançam ou ultrapassam em até outo vezes o comprimento de onda, esse efeito tem um sentido preferencial que é no curso de propagação da radiação. Na fibra este fenômeno é aumentado quando a luz atravessa imperfeições geométricas, variações na forma entre o núcleo e a casca. Para qualquer tipo de fibra a atenuação esperada é menor que 0.03dB/Km, para fibras monomodo é menor do que 0.01dB/Km. (PINHEIRO, 2017).

Os efeitos do espalhamento Mie são muito mais severos, mas, felizmente, eles podem ser eliminados por técnicas de fabricação apropriadas. (HALLIDAY, 2018).

Na natureza se manifesta no céu na cor alaranjada, Figura 7.

Figura 7 - Efeito MIE pôr do sol no horizonte



Fonte: College Canon. Como fotografar o pôr do sol (2020)

2.3.1.3 BRILLOUIN

Halliday, (2018, p. 161) diz que o este efeito é gerado em níveis elevados de potência pela modulação do sinal óptico propagante por vibrações moleculares dentro do meio (vidro), com unidades de energia vibracional chamadas fônons na faixa de frequências acústicas. Essa modulação gera novas frequências e, portanto, espalha energia para essas novas frequências e, em alguns casos, para modos indesejáveis. A energia espalhada para esses modos não-desejados irá se dissipar, o que representará um mecanismo de perda para o campo óptico. As novas frequências geradas se propagam na direção contrária à do sinal óptico de interesse.

Em outras palavras: se trata de um efeito não linear gerado por campos ópticos elevados transmitidos no núcleo da fibra, surge da interação entre a luz e o material. A variação do campo elétrico induz vibrações acústicas no meio através de eletroestrição ou pressão de radiação – efeito na qual um isolante pode se deformar ou mudar de forma.

2.3.1.4 RAMAN

O fenômeno só se verifica quando a potência aplicada for grande, da ordem de 10 a 1000 vezes maior do que no caso do espalhamento de Brillouin. Quando a transmissão pela fibra óptica estiver sendo feita em um único comprimento de onda, a potência típica para dar origem ao efeito Raman é da ordem de 50mW a 100mW. Portanto, para os níveis de sinal mais comuns, a perda de potência causada por esse tipo de problema não é significativa na transmissão de informações em fibras ópticas. (RIBEIRO, 2009)

Nessa situação, a transferência de potência ocorre preferencialmente na direção de propagação. (PINHEIRO, 2017).

2.4 DISPERSÃO

O comprimento dos enlaces de fibra ópticas são determinados pela atenuação e distorção do pulso luminoso. A dispersão é um fenômeno que ocorre em meios materiais no momento da propagação dos campos eletromagnéticos, provocando atrasos no sinal. Pinheiro (2017, p.46) afirma que diferentes naturezas de interação causam diferentes efeitos de dispersão, e que o fenômeno de dispersão está ligado ao fato de que os sinais podem ser transmitidos com velocidades diferentes, resultando diferentes atrasos de propagação dos modos que transportam a energia luminosa. O efeito dessa distorção é termos um limite na

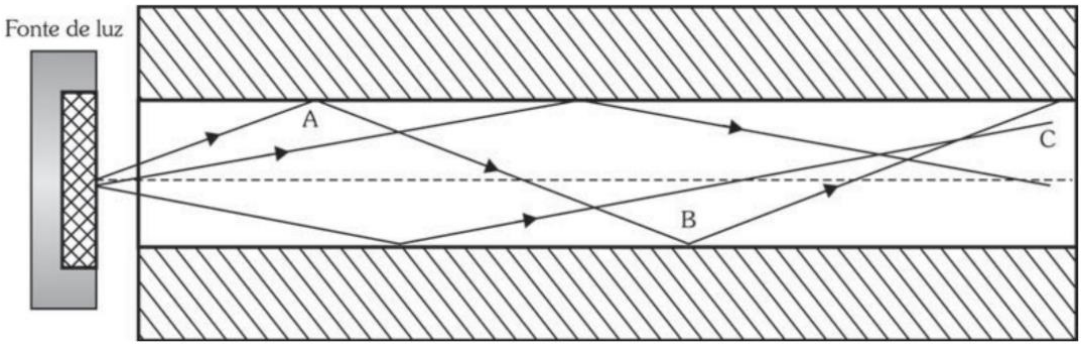
capacidade de transmissão. Na fibra óptica temos três tipos de dispersão: modal, cromática e por modos de polarização.

Halliday (2018, p. 493) diz que dispersão consiste no alargamento que um pulso de informação sofre ao se propagar ao longo de um enlace óptico. O alargamento total sofrido pelo pulso deverá ser menor que um valor máximo definido pelas especificações do sistema. Esse valor é, usualmente, uma fração do intervalo de tempo correspondente a um bit.

2.4.1 Dispersão modal

A luz percorre a fibra por diferentes caminhos ópticos, ver Figura 8, aparecendo diferentes atrasos no pulso luminoso, isso se chama dispersão modal. É a maior fonte de atrasos nas fibras multiomodo. A dispersão modal é nula em fibras monomodo, pois somente um modo será guiado.

Figura 8 - Dispersão da luz no núcleo da fibra óptica.



Fonte: Comunicações Ópticasm p.118, 4ª ed 2009, RIBEIRO.

2.4.2 Dispersão cromática

Infelizmente, nas transmissões próximas do comprimento de onda de 1.55 µm, a fibra óptica comum apresenta baixa atenuação, mas tem elevada dispersão cromática. Portanto, para o emprego do amplificador óptico, é conveniente utilizar um modelo especial de fibra com dispersão deslocada ou de dispersão plana. (RIBEIRO, 2009).

Como depende exclusivamente do comprimento de onda, é dita cromática. É a principal fonte de atraso em fibras monomodo, este efeito divide-se em dois tipos: dispersão material e dispersão por guia de onda. (PINHEIRO, 2017)

2.4.2.1 Material

Os vidros utilizados na fabricação das fibras ópticas o índice de refração depende do comprimento de onda. Quando a variação da velocidade de fase da onda é causada por alguma propriedade do material na qual ela viaja, este efeito é denominado de dispersão material. Temos também que a fonte emissora de luz não é ideal, existe uma certa largura espectral finita, cada comprimento de onda assimila um valor diferente de índice de refração, fazendo com que cada comprimento de onda viaje com velocidade diferente no núcleo da fibra óptica, acarretando no alargamento do pulso luminoso. (AMAZONAS, 2005).

2.4.2.2 Guia de onda

Provocada por oscilações construtivas de tamanho do núcleo e divergências no perfil de índice de refração ao longo do caminho da fibra óptica. É percebida em fibras monomodo de dispersão material reduzida. O efeito da dispersão de guia de onda no alargamento de pulsos pode ser aproximado assumindo que o índice de refração do material é independente do comprimento de onda. (KEISER, 2014).

2.4.2.3 Dispersão por modos de polarização

Efeito causado pela variação da velocidade de propagação dos componentes de polarização e propagação. Acontece por causa do efeito de birrefringência da fibra (fenômeno que consiste em dois ramos refratados a partir de um único raio inicial quando este incide sobre um meio), em função de tensões sofridas pela fibra no processo de puxamento e de imperfeições mecânicas no núcleo e nas interfaces núcleo-casca da fibra óptica. De acordo com Pinheiro (2017, p. 47), é um fator importante a ser considerado no projeto para altas taxas de transmissão, velocidade acima de 2,5 Gb/s, em longas distâncias. Nas fibras multimodo também ocorre, porém é mascarada pela dispersão modal.

2.5 ABSORÇÃO

Pinheiro (2017, p.47) afirma que a fibra, apesar de ter um elevado grau de pureza, absorve energia luminosa dentro de regiões específicas de comprimento de onda. Este fenômeno é causado pela transformação da luz em calor pelas moléculas do vidro. A principal

molécula responsável por essa absorção é a Oxidrila (OH^-) residual, além de elementos dopantes usados para modificar o índice de refração da fibra. Esta absorção da onda ocorre em comprimentos de onda discretos, sobretudo em 1000nm, 1400nm e acima de 1600nm. As perdas podem ser classificadas como:

2.5.1 Absorção por defeitos estruturais

Acontece quando a composição do material da fibra apresenta imperfeições, exemplo: falta de moléculas ou a existência de defeitos do oxigênio na estrutura do vidro. Para Pinheiro (p. 48, 2017) esse tipo de absorção é geralmente desprezível com relação as absorções abordadas a seguir: intrínseca e extrínseca. No entanto, durante sua construção, uma fibra óptica fica sujeita a uma radiação de alta intensidade pode afetar a estrutura atômica do material.

2.5.2 Absorção Intrínseca

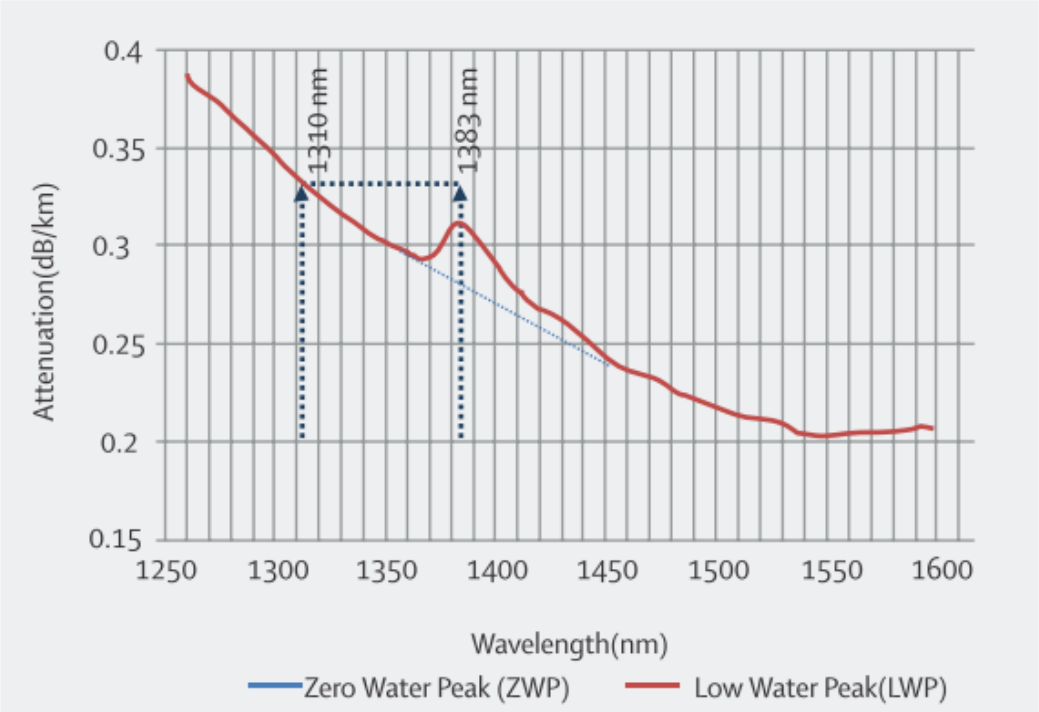
Originada pela interação da luz com componentes do material que compõe a fibra óptica, ocorre principalmente na faixa de comprimento de onda do ultravioleta. Este tipo de absorção depende diretamente do tipo de material utilizado na construção da fibra e integra o principal fator físico, definindo a transparência do material na região espectral especificada.

Ocorrendo uma produção perfeita (sem nenhum tipo de impureza no material, sem variações na densidade, homogeneidade, etc), a absorção intrínseca impõe um limite mínimo fundamental na absorção para qualquer tipo de material utilizado. As perdas por absorção intrínseca são inferiores a 0,003 dB/Km, para comprimentos de onda entre 1300nm e 1600nm. (PINHEIRO - 2017).

2.5.3 Absorção extrínseca

Causada pela interação da luz com impurezas do material, resulta da contaminação da fibra óptica durante o processo de fabricação. Um exemplo desse tipo de perda é a presença do íon hidroxila (OH^-), conhecido usualmente de forma errônea como atenuação pelo pico de água (WPA – *Water Peak Attenuation*), mas não é a presença de água que a faz atenuar e sim somente o íon OH^- (TELECO, 2007). Logo abaixo temos uma tabela (Tabela 2) referente às fibras de baixa atenuação, recomendação ITU-T G652D para *Zero Wavelength Dispersion*, assim como a comparação entre uma fibra de baixa e outra de atenuação zero, Figura 9

Figura 9 - Comparação entre fibra óptica de baixa atenuação e zero por pico de OH^-



Fonte: https://www.stl.tech/ (2020)

Tabela 2 - Especificação ITU-T G652D

Fibre attributes			
Attribute	**Detail**	**Value**	**Unit**
Mode field diameter	Wavelength	1310	nm
	Range of nominal values	8.6-9.2	µm
	Tolerance	± 0.4	µm
Cladding diameter	Nominal	125.0	µm
	Tolerance	± 0.7	µm
Core concentricity error	Maximum	0.6	µm
Cladding noncircularity	Maximum	1.0	%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260	nm
Macrobending loss	Radius	30	mm
	Number of turns	100	
	Maximum at 1625 nm	0.1	dB
Proof stress	Minimum	0.69	GPa
Chromatic dispersion parameter	λ_{0min}	1300	nm
	λ_{0max}	1324	nm
3-term Sellmeier fitting (1260 nm to 1460 nm)	S_{0min}	0.073	ps/(nm^2 × km)
	S_{0max}	0.092	ps/(nm^2 × km)
Linear fitting (1460 nm to 1625 nm)	Minimum at 1550 nm	13.3	ps/(nm × km)
	Maximum at 1550 nm	18.6	ps/(nm × km)
	Minimum at 1625 nm	17.2	ps/(nm × km)
	Maximum at 1625 nm	23.7	ps/(nm × km)

Cable attributes			
Attribute	**Detail**	**Value**	**Unit**
Attenuation coefficient (Note 1)	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.40	dB/km
	Maximum at 1383 nm ±3 nm after hydrogen ageing (Note 3)	0.40	dB/km
	Maximum at 1530-1565 nm	0.30	dB/km
PMD coefficient (Note 4,5)	M	20	cables
	Q	0.01	%
	Maximum PMD_Q	0.20	ps/$\sqrt{km}$

NOTE 1 – The attenuation coefficient values listed in this table should not be applied to short cables such as jumper cables, indoor cables and drop cables. For example, [b-IEC 60794-2-11] specifies the attenuation coefficient of indoor cable as 1.0 dB/km or less at both 1310 and 1550 nm. Attenuation coefficient at a wavelength longer than 1625 nm (for monitoring purpose) is not well known. In general, the attenuation increases as the wavelength increases, and it may show steep wavelength dependence due to both macro- and microbending losses.

NOTE 2 – This wavelength region can be extended to 1260 nm by adding 0.07 dB/km induced Rayleigh scattering loss to the attenuation value at 1310 nm.

Fonte: ITU-T Rec. Series G Supplement 40 (10/2018) Optical fibre. www.itu.int

2.5.4 Absorção total

É a somatória de todas as perdas por efeitos estruturais, absorção intrínseca e absorção extrínseca.

2.6 PERDAS POR CURVATURAS

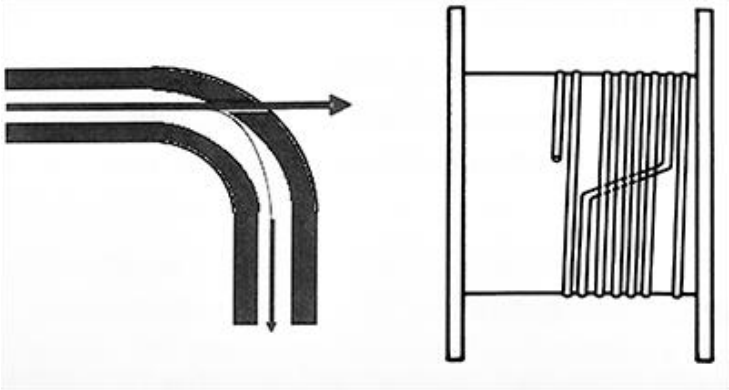
Mostrou-se que na ocorrência de uma curvatura na fibra óptica podem ser originados modos de ordens superiores, que são mais fracamente guiados do que os de ordem mais baixa. Do ponto de vista da óptica geométrica, corresponde a uma incidência com ângulo muito próximo do ângulo crítico ou mesmo inferior a ele. Em consequência, a energia da luz correspondente no núcleo é transferida para a casca. (RIBEIRO, 2009).

A luz quando viaja pelo guia de onda passa por curvaturas, algumas macroscópicas, ocasionadas por dobras, ou microscópicas causadas por pequenas ondulações entre a interface da casca e o núcleo, alguns raios de luz podem formar um ângulo inferior ao ângulo crítico e sair da fibra, ocasionando a perda de potência. (PINHEIRO, 2017).

2.6.1 Macrocurvaturas

Quando o raio da curvatura é grande se comparado com o diâmetro da fibra. Ocorre quando se enrola um cabo óptico no carretel para transporte ou por dobro quando se contorna um canto ou esquina (Figura 10). Dependendo da norma e do tipo de fibra utilizada, deve-se respeitar um raio mínimo, usualmente adotando-se acima de 10cm evitamos este tipo de problema. (PINHEIRO, 2017).

Figura 10 - Macro curvatura em um cabo óptico.



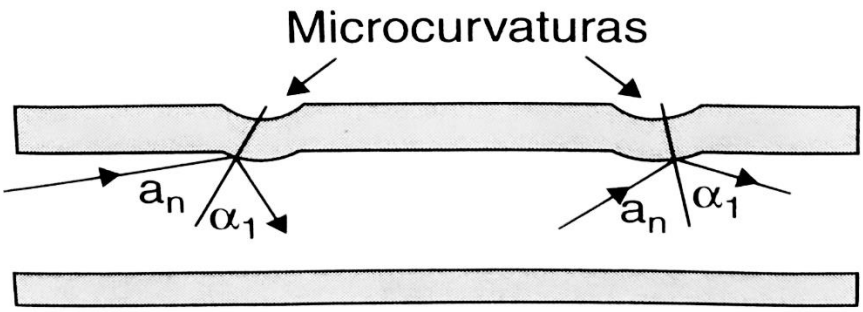
Fonte: Redes Ópticas de Acesso em Telecomunicações, 1ª ed., 2017 – PINHEIRO, p. 50.

2.6.2 Microcurvaturas

De acordo com Pinheiro (p. 50, 2017), microcurvaturas são dobras aleatórias ocorridas no eixo da fibra cujos raios são próximos ao raio do núcleo da fibra e ocorrem quando são incorporadas em cabos ópticos. Essas fibras são enroladas em carretéis, pequenas irregularidades do suporte podem afetar a integridade do material e causar essa atenuação, ver Figura 11.

Em fibras multimodo, as perdas por microcurvaturas são irrelevantes e independentes do comprimento de onda. Já em monomodo as perdas aumentam significativamente a partir de certos comprimentos de onda e podem ser resolvidos utilizando-se a construção de cabo chamada *loose*.

Figura 11 - Perdas por microcurvaturas



Fonte: Redes Ópticas de Acesso em Telecomunicações, 1ª ed., 2017 – PINHEIRO, p. 50.

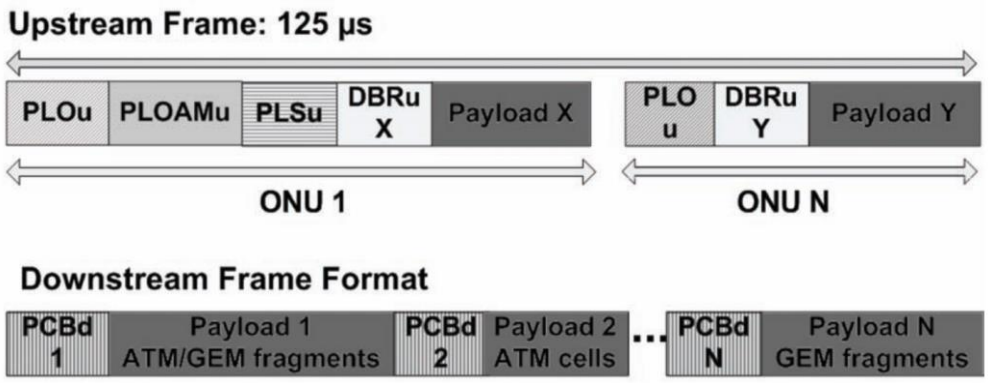
2.7 CONCEITO OPERACIONAL DES REDES PON

A ONT ou ONU é o elemento que se situa diretamente nas instalações do cliente. O objetivo é proporcionar uma conexão óptica com a PON no lado de contrafluxo e fazer a interface elétrica para o equipamento local do cliente. Dependendo das necessidades de comunicação do cliente ou bloco de usuários, a ONT geralmente suporta uma mistura de serviços de telecomunicações, incluindo várias taxas de Ethernet, conexões telefônicas T1 ou E1 (1,544 ou 2,048 Mb/s) e DS3 ou E3 (44.736 ou 34.368 Mb/s) interfaces ATM (155 Mb/s) e formatos digitais e analógicos de vídeo. (KEISER, 2014).

Já a OLT é o elemento concentrador da rede óptica, é nela que os sinais são emitidos e recebidos através das interfaces elétricas ou ópticas, ela executa funções de um *Switch LAN* e distribuem através dos terminais de usuários (ONUs/ONTs) completando a solução, integrando dados de áudio, vídeo, sistema de segurança e sistema de automação. (CIANET, 2020).

O protocolo de transporte de dados se dá em padrão TDM (*Time Division Multiplexing*) através de uma estrutura de sincronismo sobre o protocolo GEM (*GPON Encapsulation Method*), no sentido um para muitos. Os dados TDM são empacotados no GEM permitindo que o tamanho do quadro varie de acordo com o deslocamento da frequência deste. Tem como principal característica a utilização de células de comprimento fixo em 53 bytes. No sentido *downstream* as células são transmitidas a todas as ONUs, sendo que o quadro de dados consiste em 54 células mais 2 células para PLOAM (*Physical Layer Operation, Administration and Maintenance* – Operação, Administração e Manutenção da Camada Física). Na especificação GPON, o formato do quadro é definido para ambos os canais de comunicação. No sentido *downstream* temos um quadro fixado de 125 μs síncrono com um *clock* de 8 KHz. O quadro periódico de *downstream* é utilizado para manter o sincronismo global de todo o sistema. No sentido de *upstream* o comprimento do quadro também é fixado em 125 μs, Figura 12, e o protocolo de acesso é feito de muitos para um, TDMA (*Time Division Multiple Access*). (CHOCHLIOUROS, 2010).

Figura 12- Quadro *Upstream* e *Downstream* do formato especificado para GPON

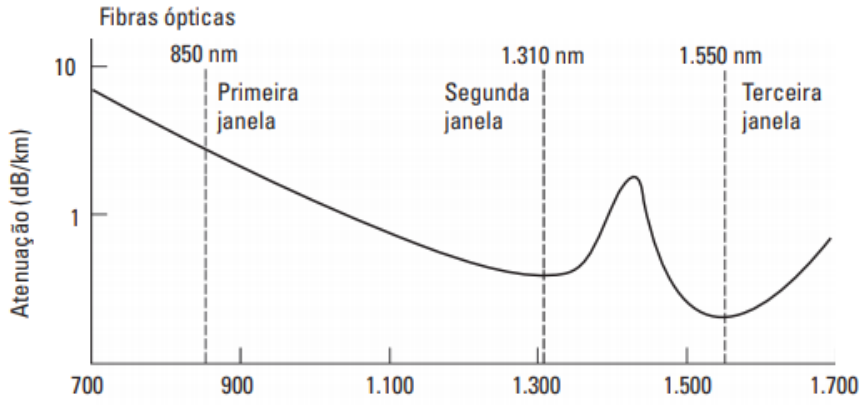


Fonte: Optical Access Networks and Advanced Photonics: Technologies and Deployment Strategies, 2010 – CHOCHLIOUROS, p. 127.

De uma forma geral o conceito operacional de uma rede *PON* trata-se de uma linha de alimentação principal que vai até um divisor óptico, *splitters*. Temos um limite de 128 filiais na atual composição da tecnologia até as interfaces conhecidas na outra ponta como *ONTs* — *Optical Network Terminal*. No caso da tecnologia GPON é necessário respeitar o limite de distância entre a primeira e a última unidade. Não se pode exceder 20km entre a primeira e a última *ONT* a ser provisionada, e não deve exceder 60km (no caso da primeira *ONT* iniciar em 40km da OLT). (ITU-T G984.1, 2008).

A tecnologia GPON opera na região de baixa perda, em duas janelas: uma centrada na segunda janela, 1310nm, e centrada na terceira janela, 1550nm, banda O e banda C respectivamente, como se pode ver na figura abaixo (Figura 13):

Figura 13 - Atenuação em dB/km em razão do comprimento de onda na fibra-óptica



Fonte: Comunicações por Fibras Ópticas, 4ª edição, 2014 – KEISER, p. 9.

A norma ITU-T G.984.5, tabela 1 páginas 7 e 8 - *Parameters for wavelength allocation GPON downstream* - define que a tecnologia GPON utilize um comprimento de onda de 1490nm, janela compreendida entre 1480nm e 1500nm para transmissão de *downlink*, fluxo de voz e dados para as ONTs e um comprimento de onda de 1310nm, janela compreendida entre 1300nm e 1320nm, para o caminho de retorno, *uplink*, no contrafluxo utilizando-se de fibras monomodo para sua propagação, ou seja, é utilizada somente uma única fibra para o transporte de dados de forma bidirecional.

De acordo com PINHEIRO (2017, p.207) devemos observar em nosso projeto de rede óptica:

> Para que uma rede óptica seja eficaz e atenda às necessidades dos usuários, ela deve ser construída de acordo com as normas técnicas vigentes e segunda uma série sistemática de etapas planejadas independentemente do tamanho e do seu grau de complexidade. Um bom projeto e a utilização de produtos homologados garantem qualidade da rede, alta disponibilidade do sinal e grande satisfação dos usuários, além de um ciclo de vida útil prolongado e com suporte a diversas tecnologias.

Logo, para a idealização do projeto de rede em fibra óptica é preciso um estudo particular detalhado de como será a malha. Cada arquitetura pode exigir uma aplicação peculiar, pois dependendo da difusão geográfica dos clientes temos que adotar estratégias diversas de implementação.

De acordo com Pinheiro (p. 209, 2017), um projeto *PON* implica utilizarmos uma metodologia, conhecimento das técnicas de manuseio, instalação, conexão e manutenção dos cabos ópticos, assim como o conhecimento detalhado do comportamento dos elementos ativos e passivos da rede, suas especificidades de construção, instalação e comissionamento.

O projeto deve conter metas de curto prazo, tais como o investimento inicial e o retorno sobre o investimento, sem deixar de levar em conta que também é um investimento de longo prazo, uma vez que está sendo construída uma estrutura física que pode passar por mudanças tecnológicas em sua parte ativa e coexistir com demais elementos da evolução. Um projeto bem elaborado é aquele que reduz os custos e potencializa o lucro.

Ainda, segundo Pinheiro (p. 227, 2017), devemos observar diversos detalhes técnicos do projeto executivo tais como:

- Escolha da Tecnologia
- Topologia física e lógica da rede
- Localização dos *splitters* e a razão de divisão do sinal
- Estudo de penetração junto aos usuários para atendimento

- Reservas técnicas visando ampliações não previstas e manutenções
- Mapa da base da rede projetada
- Detalhamento dos pontos de emenda
- Detalhamento das instalações das caixas nos postes, prédios, entre outros
- Identificação das caixas de atendimento
- Orçamento de potência
- Cálculo da viabilidade do projeto ao atendimento das recomendações
- Cálculo de carregamento nos postes referente à instalação de cabos
- Visualização de rota, com identificação de fibras, caixas, *splitters*, portas ópticas etc.
- Relação de materiais a serem utilizados

2.8 TAXA DE PENETRAÇÃO DA REDE

A rede PON precisa atingir uma penetração satisfatória nas áreas de cobertura. Conceitualmente, a taxa de penetração do serviço é calculada considerando o número de usuários da rede em uma determinada região e o respectivo número de instalações domiciliares habitadas atendidas.

A área de cobertura é dividida em blocos que equivalem cada um a uma região ou área de distribuição fixa. As áreas de distribuição fixa foram subdividas em pequenos blocos denominados células. O projeto lógico deve definir a taxa de penetração da rede, ou seja, o percentual de clientes a serem atendidos por região e por célula. Os *splitters* de distribuição são instalados nas áreas de distribuição fixa, conectando cada usuário final por meio de cabos *drop*. O tamanho da área de distribuição e o número de usuário por célula afetará o custo de construção do sistema, especialmente nos casos de rede aérea.

Daí a importância de se contabilizar o número de possíveis assinantes para termos a percepção da demanda a ser atendida na região. Dessa forma garantimos que não terá que ser feito algum retrabalho ou uma reestruturação inesperada da rede por recursos não aproveitados.

De acordo com PINHEIRO (2017, p.228):

> Através do loteamento da rede em regiões de abertura e divisão em células, com a marcação das edificações e a contagem de unidades habitacionais, é possível agregar os possíveis pontos de atendimento ou confirmar uma demanda percebida. Isso envolve o mapeamento urbano, contendo o arruamento, nomes de logradouros e indicação dos prédios que podem comportar equipamentos ativos. Essa indicação preliminar pode ser feita mediante projetos e plantas provisórias ou definitivas das

localidades, indicando ainda as alternativas para infraestrutura subterrânea (linhas de dutos) ou aérea (posteamento).

A taxa de penetração é definida como:

$$T_P(\%) = \frac{HP}{D} \tag{3}$$

HP: número de potenciais instalações, caminho por onde a fibra passa (*Homes Passed)*

D: demanda a ser atendida

É também levado em conta a quantidade de usuários que realmente se tornaram assinantes do serviço (T_A) em relação ao número de assinantes potenciais. É levado em quanto por questões de gerenciamento.

$$T_A(\%) = \frac{HC}{HP} \tag{4}$$

HC: casas conectadas (*Homes Connected*)

Por exemplo um valor numérico: tenhamos uma rede localizada numa área de distribuição dividida em células de 8 lotes e 60 residências em cada lote. Foi previsto no projeto uma adesão de 80% das residências em cada lote pois era a primeira operadora de alta velocidade na região. Mas, após a ativação da rede, foi constatada uma adesão de somente 50% das residências em cada lote.

O HP e o percentual de usuários efetivamente atendidos é:

$HP = T_P * D = [8 * 60] * 0{,}80 \ = \ 384$

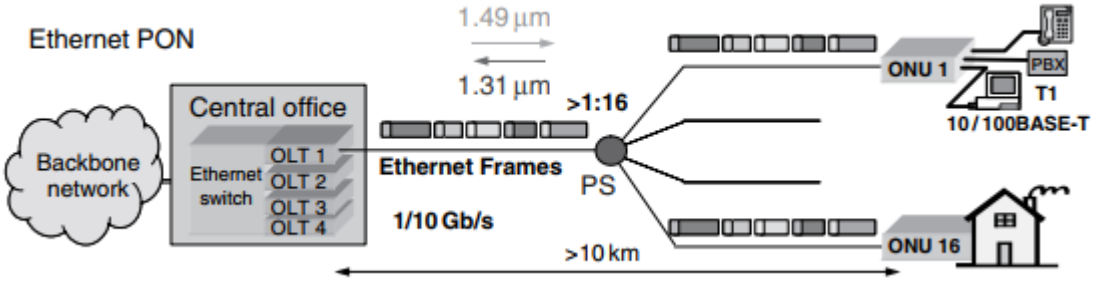
$T_A = \frac{0{,}5*8*60}{384} = 63\%$

Apesar não termos atingido a taxa de penetração esperada, 80%, a adesão real foi de 63%, a rede está preparada para atender a todos os lotes inicialmente previstos no projeto.

2.9 ARQUITETURA BÁSICA DE UMA REDE PON

Numa rede PON, um fio de fibra óptica monomodo segue para um divisor de potência óptica passiva onde o sinal é dividido para N caminhos separados para os assinantes (Figura 14).

Figura 14 - Comprimentos de onda de uplink e downlink na rede GPON



Fonte: Optical Fiber Telecommunications V B, System and Networks, Fifth Edition – p.380 (2008)

Todas as *ONTs* utilizam o mesmo comprimento de onda e compartilham a mesma linha de transmissão da fibra óptica, é necessário um controle de tráfego para garantir que todas possam receber de forma síncrona e sem colisões dos pacotes de dados. Cada usuário possui uma fração de tempo da linha para o upload, *TDMA* (acesso múltiplo de divisão do tempo), e a *OLT* utiliza a multiplexação por divisão no tempo (*TDM*) para combinar chamadas de fluxos de voz e dados que são destinados a usuários da *PON*.

O número de caminhos de uma rede óptica depende da quantidade de assinantes que se deseja atingir. Usualmente em uma rede balanceada são utilizados 2 divisores ópticos, um *splitter* 1:16 na CEO e outro 1:8 na CTO. As fibras partem da *OLT* diretamente para a CEO (caixa de emendas ópticas) onde acontece a primeira divisão do caminho com os dois fusionamentos do primeiro *splitter(in – out)*. E em seguida vão para CTO, onde são fusionadas as terminações em mais um *splitter* e garantirmos a mínima perda óptica nesse acoplamento. Dependendo da taxa de penetração, uma região mais densa, pode ser interessante optar por primeiro uma divisão 1:8 para depois 1:16, empregando mais recursos em CTOs porém economizando em *drops* até o cliente, pois se diminui a quantidade de lançamento em postes. Abaixo temos a Tabela 3 com valores limítrofes de atenuação:

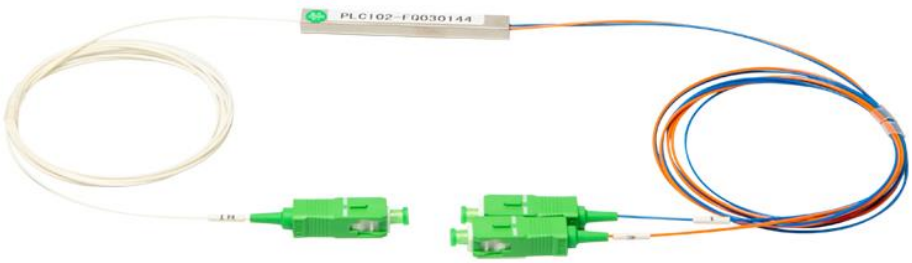
Tabela 3 - Valores de referência para atenuação *splitters*.

Splitter	Limite de atenuação
1:64	≤ 20.5 dB
1:32	≤ 17 dB
1:16	≤ 13.8 dB
1:8	≤ 10.6 dB
1:4	≤ 7.5 dB
1:2	≤ 3.8 dB

Fonte: Huawei Telecom

No caso de uma rede desbalanceada, são utilizados *splitters* desbalanceados. É interessante quando se quer obter menor atenuação no cabo de fibra óptica, evitando a repassagem por caminhos da fibra. São utilizados em projetos onde se tem baixa densidade populacional, como sítios ou chácaras ou se espera uma baixa taxa de penetração. Teoricamente podemos levar a rede próxima ao limite da tecnologia PON, 20 km máxima entre as *ONTS*. Esses *splitters* dividem de forma assimétrica a saída de energia. Comercialmente são encontrados sob a forma 1:2 (um para duas fibras - 1 *in* / 2 *out*, Figura 15) e sua divisão de potência óptica se dá em passos de 5% (65-35, 75-25, 85-15, 95-5) ou de 10% (60-40, 70-30, 80-20, 90-10).

Figura 15 - Splitter 1:2 desbalanceado



Fonte: https://www.redex.com.br/produtos/splitter-optico-1x2-sc-apc/ (2020)

De um modo geral, na prática, opta-se por redes balanceadas. São redes onde a atuação da equipe técnica no campo se torna mais simplificada, sem a preocupação com a posição e o tipo de divisão/balanceamento óptico ao longo de todo o trajeto da rede. Abaixo

temos a Tabela 4 com as sensibilidades ópticas da *OLT* e da *ONT* que devem ser respeitadas na elaboração de um projeto:

Tabela 4 - Sensibilidade dos módulos transceivers dos equipamentos GPON.

Módulo *SFP*	*OLT* C+	*OLT* D	*ONT* B+
Emissão mínima (1490nm)	+3 dBm	+6 dBm	+1.5 dBm
Emissão máxima (1490nm)	+7 dBm	+10 dBm	+5 dBm
Sensibilidade óptica limite (1310nm)	-32 dBm	-35 dBm	-28 dBm
Sensibilidade óptica máxima (1310nm)	-12 dBm	-15 dBm	-8 dBm

Fonte: ITU-T G.984.2 (08-2019).

2.10 ORÇAMENTO DE POTÊNCIA

Em projetos FFTx precisamos garantir o nível de sinal dentro de uma faixa operável, em que se atenda os níveis de potência entre os equipamentos, tanto OLT quanto ONT. Esse nível de atenuação é estimado e acontece devido às perdas dos elementos passivos (*splitters*, fusões, conectores, fibra óptica) durante o caminho do feixe luminoso.

O orçamento de potência óptica, segundo Pinheiro (p. 260, 2017), é a diferença entre a potência óptica entregue pelo transmissor à fibra e a potência requerida pelo receptor para o correto funcionamento do sistema óptico. É a máxima atenuação possível para a análise de um projeto.

$$O_P = P_{TX} - S_{RX} \quad (5)$$

Nesta avaliação deverá ser computada as perdas nos elementos passivos da rede e incluir uma margem de segurança prevendo o envelhecimento das unidades ativas do sistema. Ainda segundo PINHEIRO, o orçamento de potência (O_P) deve atender a seguinte equação (equação 5):

$$P_{TX} - A_{FO} - P_C - P_E - P_P - M_S - S_{RX} > 0 \quad (6)$$

No qual:

O_P = Orçamento de potência em dB

P_{TX} = Potência de saída (Tx) em dBm

A_{FO} = Atenuação total da fibra óptica em dB

P_C = Perda total nos conectores em dB

P_E = Perda total nas emendas em dB

P_P = Perda total nos elementos passivos em dB

M_S = Margem de segurança em dB

S_{RX} = Sensibilidade (Rx) em dBm

Para satisfazermos o orçamento de potência, é imprescindível que o emissor seja capaz de fornecer potência óptica necessária para que o sinal alcance o receptor com um nível adequado para sua detecção. A potência de saída e a perda total do enlace deve ser maior que a sensibilidade do receptor, equação 7:

$$\mathrm{P_{TX}} - \mathrm{A_T} > \mathrm{S_{RX}} \qquad (7)$$

A atenuação total (AT) do enlace é dada por:

$$A_T = A_{FO} + P_C + P_E + P_P + M_S \qquad (8)$$

Para exemplificar vamos calcular a viabilidade de um enlace óptico, mostrando numericamente valores usuais de perda energia, segue:

Uma rede PON operando em comprimentos de onda 1310nm/1490nm, com fibra óptica monomodo (atenuação de 0,3dB/km). A distância entre a OLT e a ONT é de 12 km. O nível de potência de saída informado para a ONT é de 2 dBm e a porta da OLT é 4 dBm. A sensibilidade do receptor é de -28 dBm, adote uma margem de segurança de 3dB. Deve-se considerar existência de 4 pontos de fusão (atenuação de 0,1dB por ponto) e 2 pares de conectores (atenuação de 0,75dB cada par). As perdas no componente passivo da rede (*splitter*) são de 7dB.

A atenuação total do enlace pode ser calculada utilizando a equação 7:

$$A_T = A_{FO} + P_C + P_E + P_P + M_S$$

$$A_T = 0{,}3 * 12 + 0{,}75 * 2 + 0{,}1 * 4 + 7 * 1 + 3 = \mathbf{15{,}5dB}$$

Para um cálculo mais assertivo deve-se considerar o pior caso para a potência de saída, no caso a ONT (no lado do cliente):

$$\mathrm{P_{TX}} - \mathrm{A_T} > \mathrm{S_{RX}}$$

$$P_{TX} - (A_{FO} + P_C + P_E + P_P + M_S) - S_{RX} > 0$$

$$(+2dBm) - (15{,}5dB) - (-28dBm) > 0$$

$$-13{,}5dBm > -28dBm$$

Como a condição é atendida, o enlace se torna viável.

2.11 ORÇAMENTO DE PERDA ÓPTICA E TIPOS DE CONECTORES

Para termos uma rede óptica de alto desempenho da é importante que a transmissão de dados tenha confiabilidade, baixa taxa de erro de bits (BER) e alta velocidade. Um dos fatores considerado o mais importante é ter o controle das perdas de potência na rede, conforme especificações de desempenho para enlaces ópticos da ITU-T.

A primeira etapa é avaliar e ter valores admissíveis das perdas para se construir um projeto que atenda aos requisitos da rede óptica, alguns valores usuais são encontrados na Tabela 5. Além do mais devemos observar os elementos:

- Transmissor: potência de saída, temperatura e envelhecimento.
- Receptor: sensibilidade de detecção.
- Cabo óptico: efeitos das perdas e da temperatura.
- Conexões da fibra: splitters, conectores e emendas.
- Outros: margens de tolerância para cabos e demais elementos passivos, prevenindo os efeitos de tempo e fatores ambientais, degradação das emendas, dentre outros.

Tabela 5 – Valores de referência para atenuação de componentes passivos.

Componente	Parâmetro	Valor de referência
Fibra monomodo	1550 nm	0,2 dB/km
Fibra monomodo	1310 nm	0,35 dB/km
Fibra multimodo	1300 nm	1 dB/km
Fibra multimodo	850 nm	3 dB/km
Emenda por fusão	Cada emenda	0,1 dB
Emenda mecânica	Cada emenda	0,5 dB
Conector	O par	0.75 dB

Fonte: Redes Ópticas de Acesso em Telecomunicações, 1ª ed., 2017 – PINHEIRO, p. 262.

Existem alguns tipos de conectores com valores de perdas específicos, pois cada conector tem a sua característica construtiva. A qualidade da conexão é garantida pela precisão dos componentes mecânicos que constituem o conector óptico e o alinhamento da fibra em seu interior. Alguns modelos são apresentados na Figura 16. Abaixo temos a Tabela 6 com os principais tipos utilizados em infraestrutura de redes FTTx.

Tabela 6 - Atenuação típica nos conectores.

Tipo de conector	*Tipo de fibra*	Atenuação típica a 1300nm	Reflexão (conector montado)
SC	MM	< 0,2 dB	< -25dB
SC	SM	< 0,3 dB	< -45 dB
FC/PC	MM	< 0,2 dB	< -25dB
FC/PC	SM	< 0,3 dB	< -45dB
ST	MM	< 0,2 dB	< -30 dB
ST	SM	< 0,2 dB	< -45 dB
ST Push Pull	MM	< 0,2 dB	< -25 dB
ST Push Pull	SM	< 0,3 dB	< -45 dB
SM = Monomodo (Single MODE) MM = Multimodo (Multimode)			

Fonte: Redes Ópticas de Acesso em Telecomunicações, 1ª ed., 2017 – PINHEIRO, p. 263.

Figura 16 – Tipos de conectores mais utilizados em redes de fibra ópticas

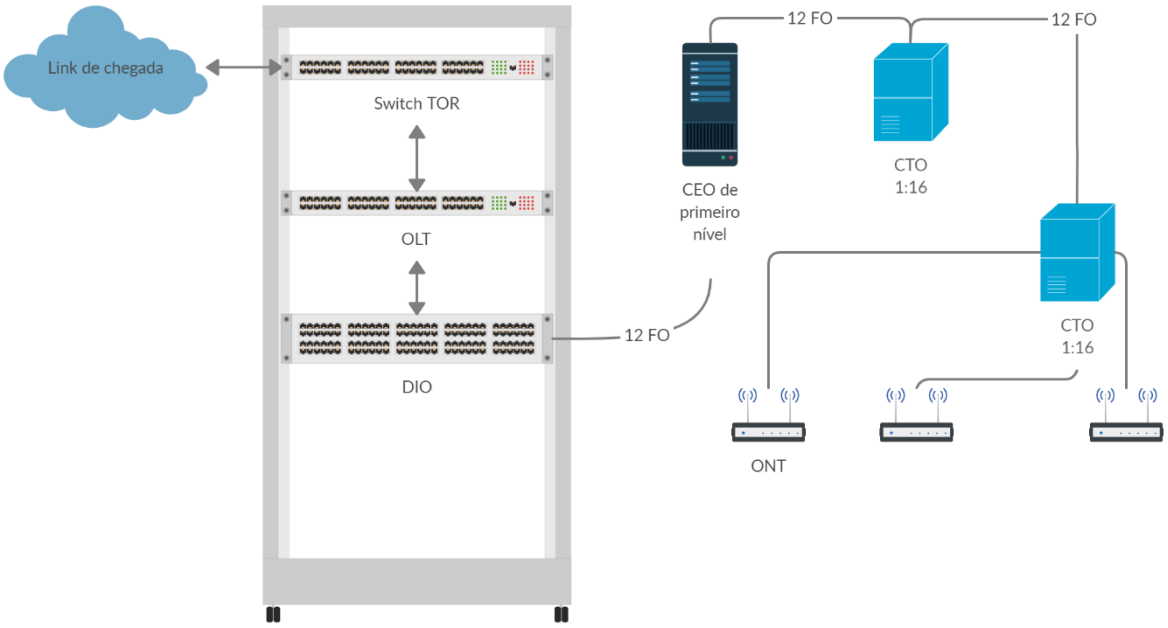
Fonte: Catálogo de produtos http://portuguese.opticalfiberpatchcord.com/ (2020)

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 TOPOLOGIA BÁSICA

A topologia básica para entrega do link para as unidades de atendimento é feito através de um *switch TOR (top of rack)*, geralmente se conecta através de cabos 10 Gb/s por segundo com a OLT e seus módulos SFP conectados até o divisor óptico interno (DIO) que seguirá até a caixa de emendas ópticas (CEO) de primeiro nível já localizada fora das dependências do local de instalação do *rack*, Figura 17. Na CEO de primeiro nível é feita a fusão do cabo ao *splitter* que irá atender as caixas de emendas ópticas, e por conseguinte pode ser que as mesmas encaminhem o sinal para outras CTOs. Dependendo do planejamento da rede, pode ser um sinal que seguirá balanceado ou desbalanceado.

Figura 17 - Topologia básica de uma rede PON



Fonte: Autoria própria (2020).

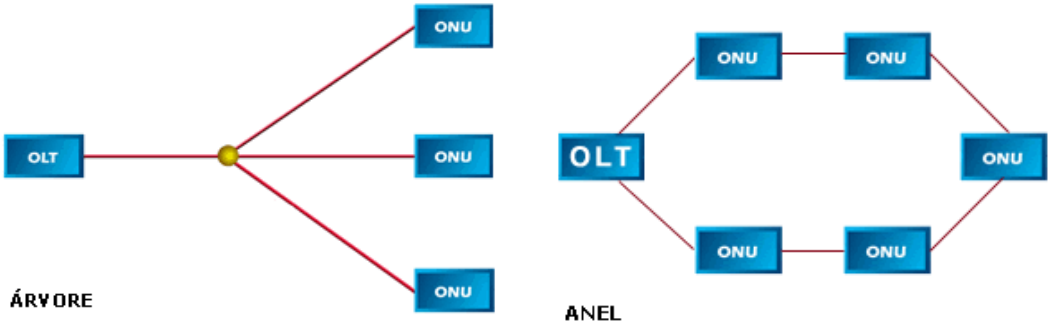
3.2 METODOLOGIA PARA PROJETO EM REDES ÓPTICAS

Este capítulo trata do tema principal deste trabalho, apresenta uma proposta para a criação de redes PON. Trata-se de um passo a passo onde são utilizados conceitos básicos descritos nos capítulos anteriores. Um projeto PON pode apresentar inúmeras características a depender das necessidades dos clientes, engenheiros ou até mesmo do departamento de TI, porém, segundo PINHEIRO (2017, p. 208), o projeto deve seguir um processo sistemático, que tem seu foco na aplicação nas metas e técnicas e no modelo de negócio da empresa. É a metodologia que ajuda a desenvolver uma visão lógica da rede antes de desenvolver uma ação física. A ênfase deve estar no planejamento antes da execução.

As instalações de cabeamento da planta externa dependem da rota que o cabo irá seguir. Podemos ter longos trechos de campos abertos, como estradas rurais ou passarmos por zonas urbanas com vários cruzamentos, e a escolha executiva do projeto pode-se até trazer uma característica híbrida, um pouco dos dois cenários.

Após ser definidos os caminhos da rede, o próximo passo é a escolha da topologia, se será utilizada anel ou árvore, Figura 18.

Figura 18 - Topologias Anel e Árvore



Fonte: TELECO (2020).

Em uma topologia de rede em anel, duas ONUs são conectadas a uma OLT criando dois segmentos PONs: PON-A e PON-B. A partir da primeira ONU do segmento PON (A ou B) são conectadas as outras ONUs de maneira serial formando um barramento óptico. Então cada ONU do barramento funciona como um derivador óptico ativo (splitter 1:1) ou um elemento passante como no SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*). Ao final dos barramentos as últimas ONUs da topologia são conectadas entre si e então fecham um anel óptico a partir de dois segmentos PONs (barramentos). As grandes vantagens desta topologia são: a

redundância da rede e a possibilidade de configuração do custo métrico de tráfego, onde é possível indicar a direção mais rápida para o tráfego, seja ela no sentido leste ou oeste. (TELECO, 2020).

Já a topologia em árvore é a mais utilizada, até por causa de seu custo. É onde as ONUs são conectadas a uma OLT por um único segmento PON. A partir dessa OLT conecta-se um segmento de fibra óptica que então recebe um derivador passivo (*splitter*). O primeiro derivador deve ter, no mínimo, um fator de derivação de 1:2 ou seja um *splitter* que cria dois sub-segmentos de fibra. Na Figura 18 o fator de derivação é de 1:3, ou seja, um *splitter* criou três sub-segmentos de fibra. A maior vantagem desta topologia é quando as ONUs estão relativamente distantes da OLT e/ou estão concentradas a partir de uma certa distância onde não existem ONUs intermediarias. Neste caso podemos lançar, por exemplo, 15 km de segmento de fibra e somente começar a derivação deste segmento a partir desta distância de 15km. (TELECO, 2020)

A vida útil de uma PON deve exceder 20 anos e permitir a substituição de cabos de distribuição ou *drop*. E escolha da topologia da rede deve possibilitar uma ampla variedade de velocidades de acesso e permitir esquemas de manutenção com baixo custo operacional.

O custo de uma rede acesso pode ser agrupados em duas categorias: os custos de construção da rede antes que os serviços sejam disponibilizados (*Homes Passed* – HP) e os custos de construção das conexões para os usuários efetivos da rede (*Homes Connected* – HC).

É necessário levantar dados do ambiente onde se deseja instalar a rede, dentre eles:

- Demarcação da região por onde irá passar o cabeamento óptico
- Posicionamento de onde chegará o link principal
- Identificação da densidade média de clientes na localidade
- Posicionamento do posteamento a ser utilizado
- Tecnologia a ser adotada
- Planta CAD
- Estimativa de banda a ser comercialilzada (mínimo e máximo)
- Pontos de saída de atendimento.

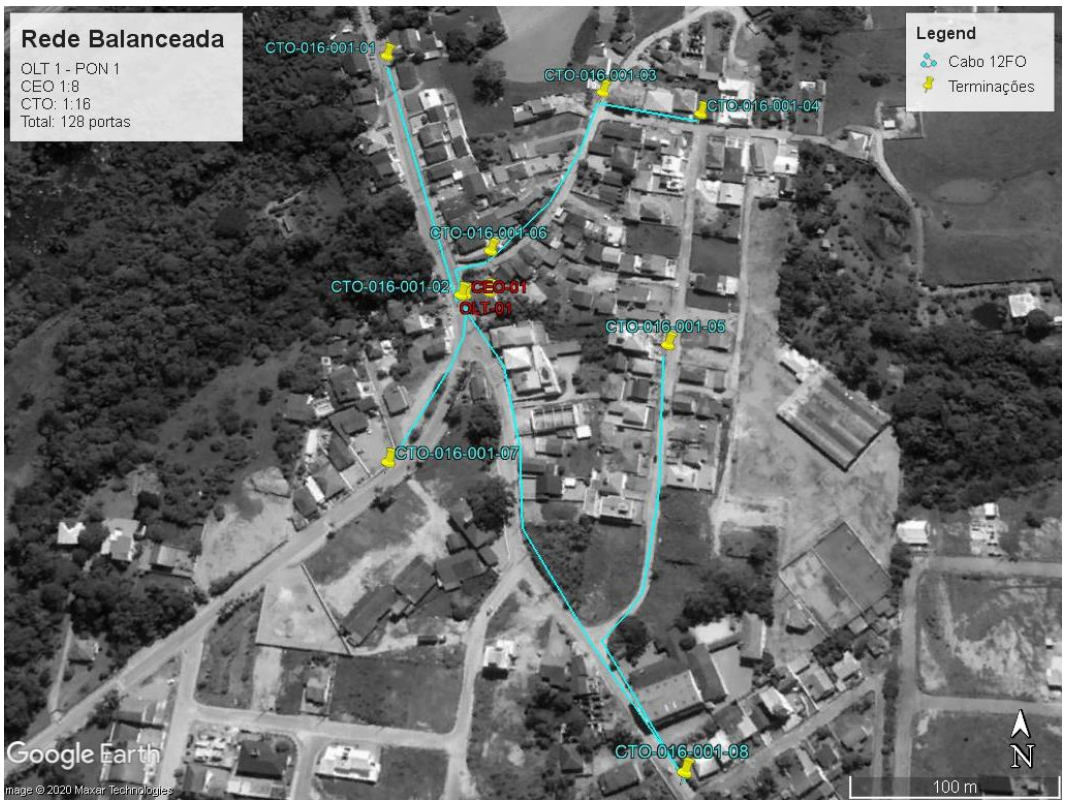
O levantamento de campo é uma metodologia aplicada na inspeção técnica do local para onde se quer instalar a nova rede óptica. Esse procedimento é realizado na etapa inicial do projeto e tem que ser analisado de uma forma que se maximize sua cobertura e seja eficiente com a meta de reduzir os custos do investimento. A seguir temos dois projetos nos quais foram aplicadas esta metodologia: um em área urbana e outra em uma zona rural.

3.3 REDE BALANCEADA

Na Figura 19 temos o lançamento da rede de fibra óptica. Apesar de ser uma cidade com densidade demográfica baixa (Santo Amaro da Imperatriz: 57,62 hab/km² IBGE-2010), adotou-se que seria uma rede balanceada através da divisão de sinal simétrico, visto que seria primeiro provedor de internet em fibra óptica e teria uma alta adesão de assinantes. Foram utilizados cabos de fibra ópticas com 12 vias (12FO) e como se trata de área urbana, os cabos foram autossustentados em postes da rede elétrica, vãos de até 60 metros, com reserva técnica de 15 metros nas CTOs próximas a regiões críticas, tais como a caixa de emendas – CEO – ou cruzamentos.

Na Figura 19 está a posição da OLT, CEO de primeiro nível, e as 8 caixas de atendimento com as terminações ópticas:

Figura 19 – Mapa e lançamento da fibra 12FO



Fonte: Autoria própria (2020)

Cabe ressaltar que, todo projeto, além de necessitar de um contrato de locação de postes junto à concessionária de energia elétrica, o projetista deverá apresentar o cálculo dos esforços assim como sua devida ART (anotação de responsabilidade técnica), pois o mesmo é

apresentado em caso de vistoria efetuada pela concessionária e em eventuais acidentes com os postes. (PINHEIRO, 2017).

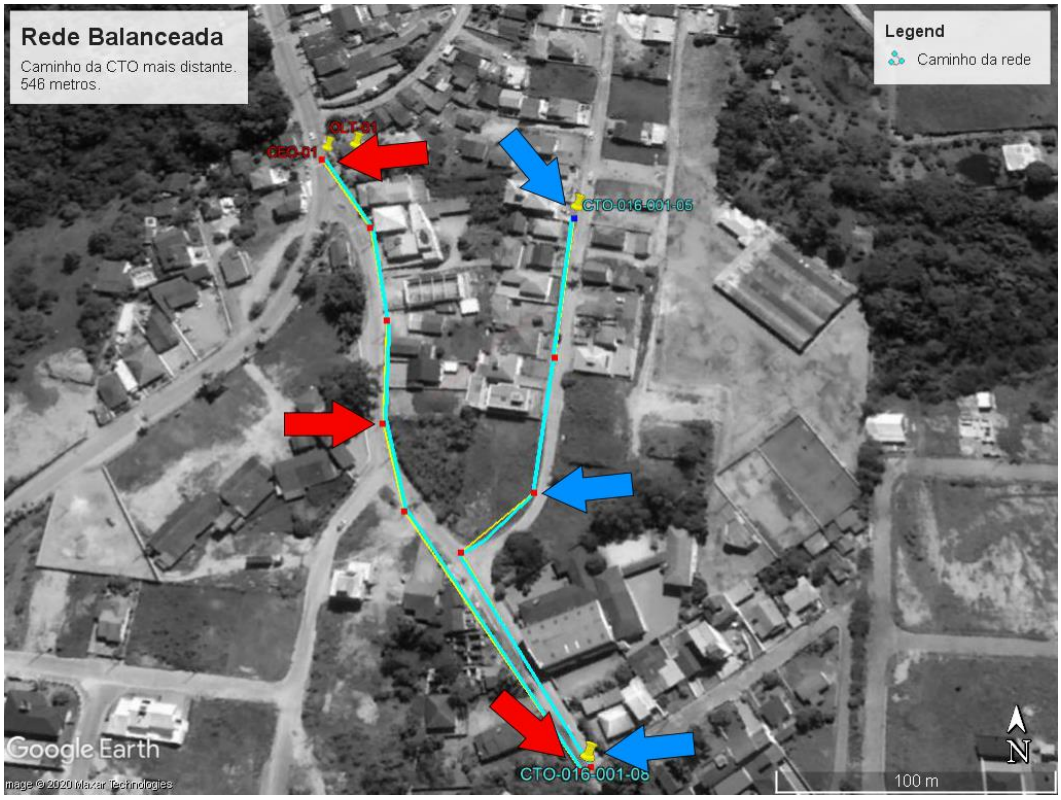
Através da aplicação *Street View* – Google® ou com visita *in loco* é possível ver o caminho e os postes na qual foi traçada a rede (Figura 20):

Figura 20 - Vista da rua

Fonte: Autoria própria (2020)

Para análise de projeto foi considerada a CTO crítica, ou seja, a mais distante neste projeto: CTO-16-001-05, a 546 metros da OLT. Nela é onde o sinal será mais atenuado pelos elementos passivos que foram adicionados na rede (emendas, *splitters* e a fibra óptica em si). Observando a Figura 19 e Figura 21, o ENL-04 passa por um caminho de 7 postes até a CTO-16-001-08. O ENL-5 retorna dessa última CTO com um cabo de 12FO e volta até o cruzamento, adentra a rua passando por mais 4 postes até a CTO-16-001-05. As reservas técnicas foram de 15 metros, adotadas em pontos críticos como cruzamentos e início/fim de rede. O início e o fim da rede foram indicados na Figura 21 através das setas vermelhas e azuis, ENL-4 e ENL-5 respectivamente. Teremos um total de 636 metros até nossa última caixa de atendimento.

Figura 21 - Caminho dos dois enlaces físicos



Fonte: Autoria própria (2020).

3.3.1 Orçamento de potência

Para o orçamento de potência (O_P) foram utilizados dados da

Tabela 4, nos seus valores mínimos de emissão e recepção. Módulo da ONT B+, sensibilidade de recepção -28 dBm e módulo OLT C+, emissão de +3 dBm. Calculando temos o valor abaixo:

$$O_P = P_{TX} - S_{RX}$$

$$O_P = +3\ dBm - (-28\ dBm)$$

$$O_P = +31\ dBm$$

Foi removido mais 3dB, é tido como um valor de envelhecimento da rede, logo o nosso orçamento de potência atualizado foi para 28 dB.

Para encontramos as perdas em nosso projeto, temos que considerar o caminho de todos os elementos passivos da rede, da OLT até o fim da rede – Figura 22, descritos na equação 9:

Figura 22 - Caminho da Fibra Óptica.

Fonte: Autoria própria (2020).

$$\begin{aligned} Módulo(SFP) \rightarrow & \ \mathbf{2 * conector\ APC} \rightarrow \mathbf{fusão} \rightarrow DIO \rightarrow \mathbf{fusão} \rightarrow CEO \rightarrow \mathbf{fusão} \\ & \rightarrow \mathbf{Spitter\ 1{:}8} \rightarrow \mathbf{fusão} \rightarrow CTO \rightarrow \mathbf{fusão} \rightarrow \mathbf{Splitter\ 1{:}16} \\ & \rightarrow \mathbf{0.636 * perda\ fibra\ monomodo\ 1310nm} \\ & \rightarrow \mathbf{2 * conector\ APC(cliente)} \end{aligned} \tag{9}$$

Acima, Equação 9, em vermelho temos os elementos de enfraquecimento do sinal. Somando-se a perda de todos os elementos passivos (P_P) e utilizando valores de referência Tabela 5 e Tabela 6, temos:

$$P_P = 4 * conector\ APC + 5 * fusão + 1 * Splitter\ 1{:}8 + 1 * Splitter\ 1{:}16$$

$$P_P = 4 * 0.3 + 5 * 0.1 + 10.6 + 13.8 + 0.636 * 0.35$$

$$P_P = 26.32dB$$

Uma atenuação total de 26.22 dB, menor do que 28 dB. A conclusão é que o enlace irá funcionar. Foi prevista a aferição de sinal, *powermeter* devidamente calibrado e com medição em comprimento de onda de 1490nm por volta de -23.32 dBm (emissor com: +3 dBm / atenuação: -26.32 dB).

Abaixo temos a Tabela 7 com os sinais das CTOs desta PON calculados e na Tabela 8 as distâncias entre dos enlaces ópticos:

Tabela 7- Sinal esperado da CTO no comissionamento da rede balanceada

Caixa de atendimento	Sinal mínimo esperado na CTO emissão OLT (SFP C+ +3 dBm)
CTO-16-001-01	-23.16 dBm
CTO-16-001-02	-23.1 dBm
CTO-16-001-03	-23.17 dBm
CTO-16-001-04	-23.19 dBm
CTO-16-001-05	**-23.32 dBm**
CTO-16-001-06	-23.11 dBm
CTO-16-001-07	-23.16 dBm
CTO-16-001-08	-23.21 dBm

Fonte: Própria (2020)

Tabela 8 - Comprimento dos enlaces

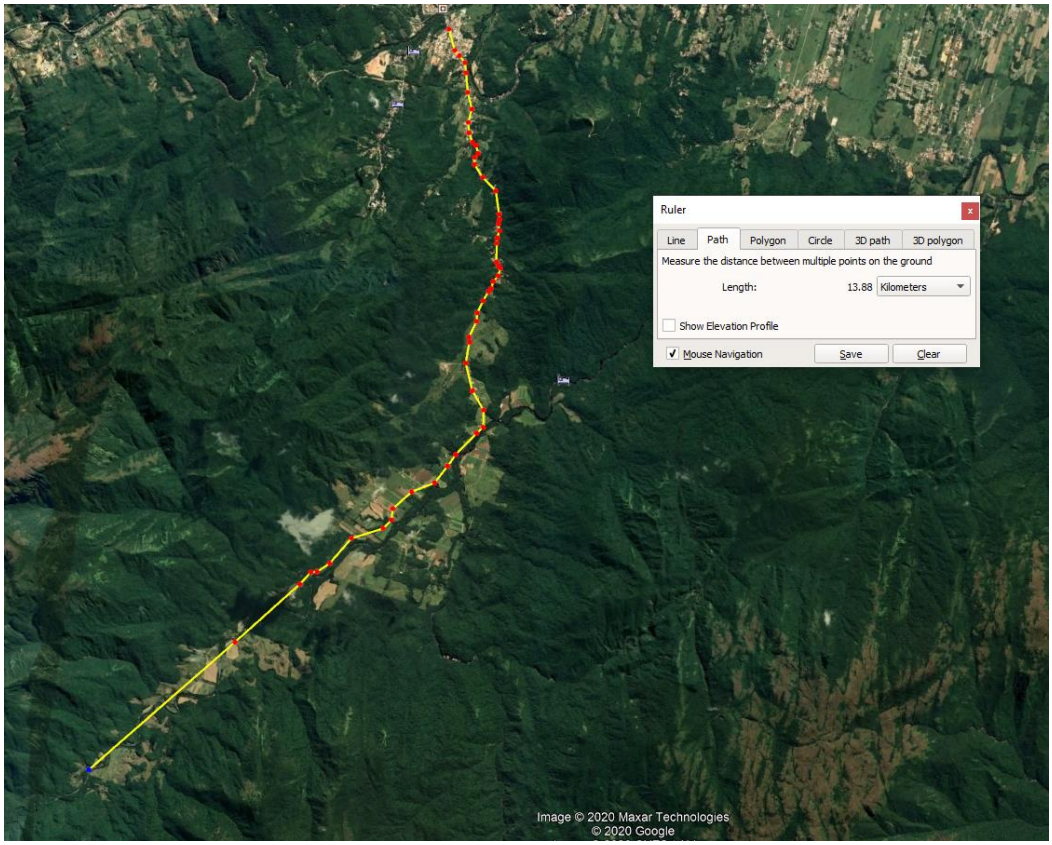
Enlace	Comprimento
ENL-1	155 m
ENL-2	216 m
ENL-3	103 m
ENL-4	287 m
ENL-5	255 m

Fonte: Autoria própria (2020).

3.3 REDE DESBALANCEADA

Na Figura 23, temos o percurso que a fibra óptica percorreu para atender os clientes neste projeto. Como se trata de uma área rural, com uma densidade de casas baixa, foi adotada a estratégia metodológica da construção de uma rede óptica com sinal desbalanceado.

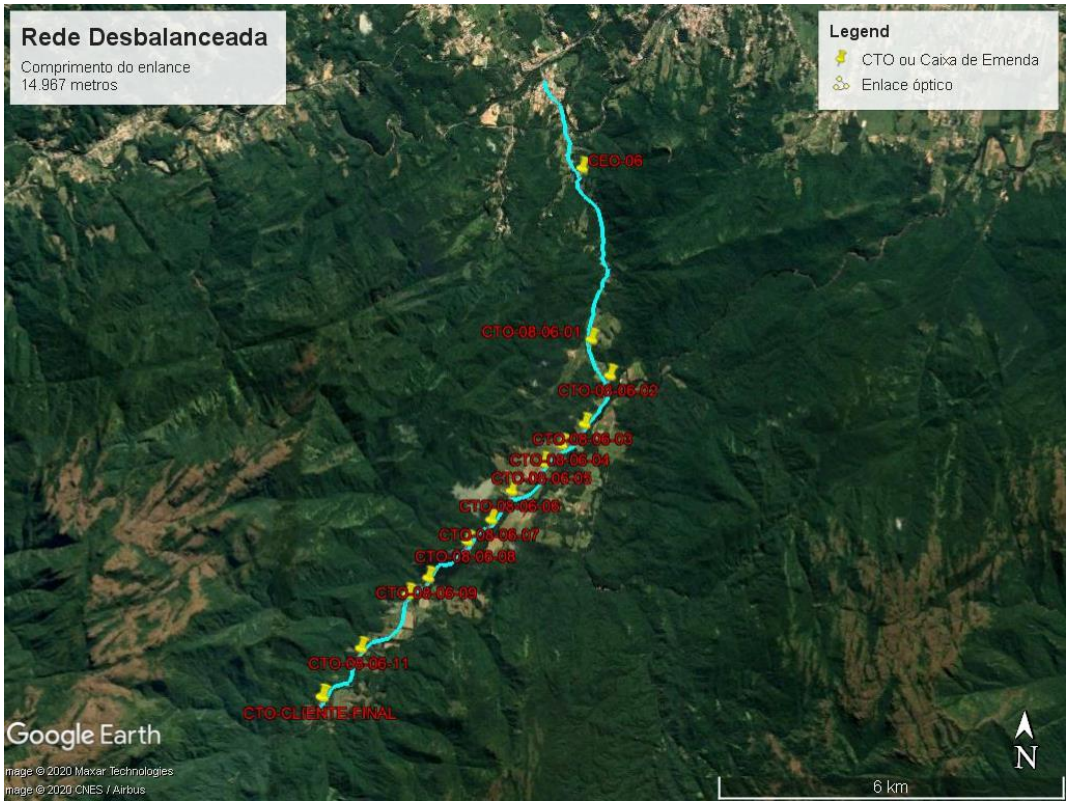
Figura 23 - Caminho da rede óptica em área rural



Fonte: Autoria própria (2020).

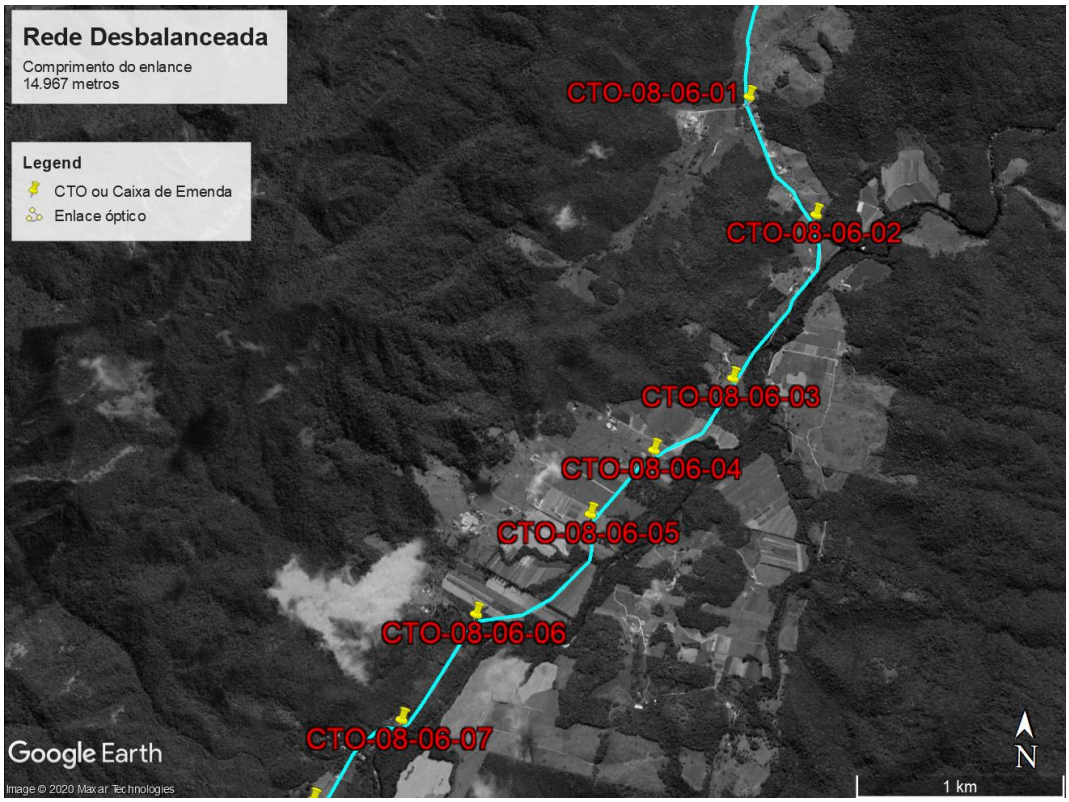
Foi feita uma distribuição de 11 caixas de atendimento ao longo do trajeto de aproximadamente 15 km de forma que atendesse um número máximo de clientes, veja Figuras 24, 25, 26 e 27:

Figura 24 – Vista aérea do enlace desbalanceado



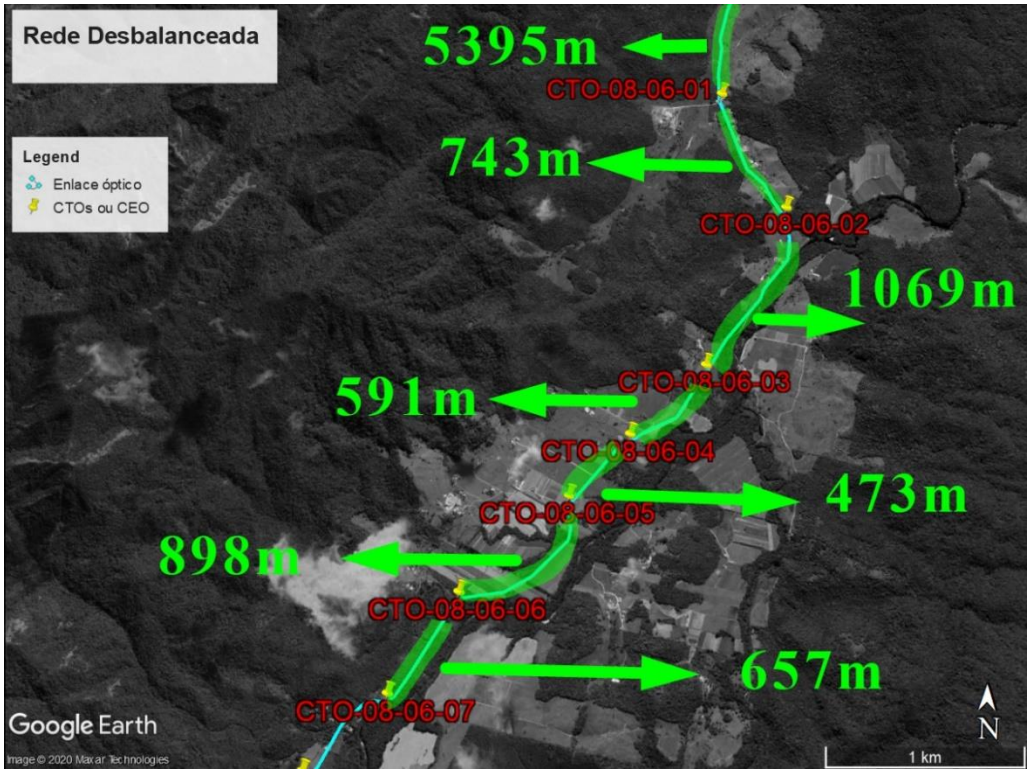
Fonte: Própria (2020).

Figura 25 – Posicionamento CTOs 01 a 07



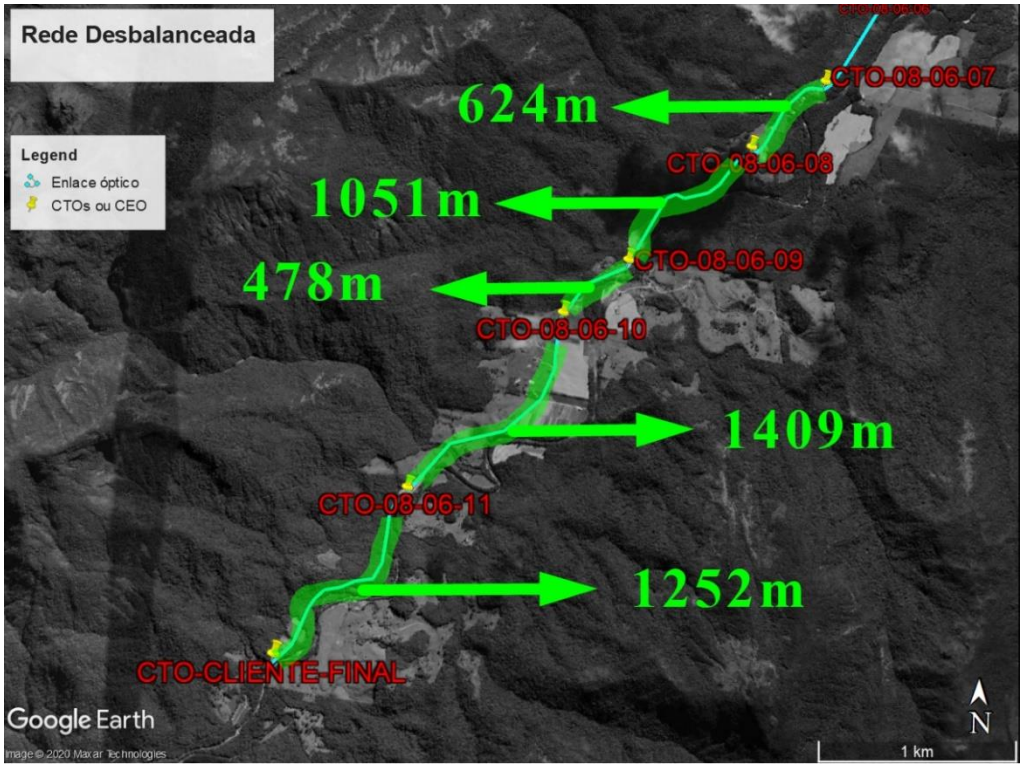
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 26 - Distância entre os enlaces desbalanceados CTOs 01 a 07.



Fonte: Própria (2020).

Figura 27 - Distância entre os enlaces desbalanceados CTO 07 até final.



Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 9 - Distância entre os enlances desbalanceados.

Caminhos	Distância
DIO até CTO-08-06-01	5.395 m
CTO-08-06-01 até CTO-08-06-02	743 m
CTO-08-06-02 até CTO-08-06-03	1.069 m
CTO-08-06-03 até CTO-08-06-04	591 m
CTO-08-06-04 até CTO-08-06-05	473 m
CTO-08-06-05 até CTO-08-06-06	898 m
CTO-08-06-06 até CTO-08-06-07	657 m
CTO-08-06-07 até CTO-08-06-08	624 m
CTO-08-06-08 até CTO-08-06-09	1051 m
CTO-08-06-09 até CTO-08-06-10	478 m
CTO-08-06-10 até CTO-08-06-11	1.409 m
CTO-08-06-11 até CTO-CLIENTE-FINAL	1.252 m
Total	**14.640 m**

Fonte: Própria (2020).

O cálculo de atenuação para a primeira CTO é demasiadamente simples. Porém, à medida é compensada a divisão de potência óptica no *splitters*. São cálculos não lineares pois os *splitters* possuem passos de 5 e 10%, tornando complicado à medida que se acrescenta mais CTOs à rede. De maneira prática, o cálculo de atenuação da rede se torna mais fácil com o auxílio de planilhas, com preenchimento de distância dos enlaces e tipo modelo de *splitter* adotado. Foi adotado o software o Excel®, através da ferramenta “validação de dados”, não qual foi criada uma tabela com todos os possíveis *splitters*, com seus dados de fabricante, no caso a tabela de atenuação de sinal. A Tabela 10 de referência foi extraída da empresa Furukawa Eletric – *Splitter* óptico 1xN desbalanceado, segue abaixo:

Tabela 10 - Atenuação óptica para splitter desbalanceado.

Splitter	Menor sinal	Maior sinal
1:99	21.6 dB	0.3 dB
2:98	18.7 dB	0.4 dB
5:95	14.6 dB	0.5 dB

10:90	11 dB	0.7 dB
15:85	9.6 dB	1 dB
20:80	7.9 dB	1.4 dB
25:75	6.95 dB	1.7 dB
30:70	6 dB	1.9 dB
35:65	5.35 dB	2.3 dB
40:60	4.7 dB	2.7 dB
45:55	4.15 dB	3.15 dB
50:50	3.7 dB	3.7 dB

Fonte: https://www.furukawalatam.com/ (2020)

Os parâmetros utilizados neste projeto foram: Módulos PON SFP D emissão mínima +6 dBm; ONTs com módulos de recepção B+ sensibilidade mínima -28 dBm; Sinal limite na CTO -25 dBm; Cabo 12FO para todo percurso; Reservas técnicas já estão inclusas nas distâncias entre os enlaces, sofreram acréscimo de 5% (Tabela 9); Demais parâmetros, como perdas de conectorização e fusão, são os mesmos da rede balanceada (Tabela 5 e Tabela 6).

3.3.1 Orçamento de potência

Para o orçamento de potência (O_P) foram utilizados dados da

Tabela 4, nos seus valores mínimos de emissão e recepção. Módulo da ONT B+, sensibilidade de recepção -28 dBm e módulo OLT D, emissão de +6 dBm. Calculando temos o valor abaixo:

$$O_P = P_{TX} - S_{RX}$$
$$O_P = +6\ dBm - (-28\ dBm)$$
$$O_P = +34\ dBm$$

Removeremos mais 3dB, é tido como um valor de envelhecimento da rede, logo o nosso orçamento de potência atualizado irá para +31 dB.

Para encontramos as perdas em nosso projeto, temos que considerar o caminho de todos os elementos passivos da rede, porém como foi dito anteriormente, é exibido um cálculo

da OLT até a primeira CTO, os demais foram calculados através da planilha de cálculo, ANEXO A encontrado na página 62, com as atenuações específicas de cada elemento desbalanceado. Na Figura 28 temos o trajeto da rede, na qual cada CTO faz uma função híbrida, desempenhando também o papel da CEO, a atenuação total é descrita na equação 10:

Figura 28 - Caminho do cabo de 12 fibras ópticas da rede desbalanceada

Fonte: Autoria Própria (2020)

$$
\begin{aligned}
Módulo(SFP) &\rightarrow \boldsymbol{conector\ APC} \rightarrow \boldsymbol{fusão} \rightarrow DIO \rightarrow \boldsymbol{conector\ APC} \\
&\rightarrow \mathbf{2.8km * 0.35} \rightarrow CEO \rightarrow \boldsymbol{fusão} \rightarrow \mathbf{2.60km * 0.35} \\
&\rightarrow CTO_{08-06-01} \rightarrow \boldsymbol{fusão} \rightarrow \boldsymbol{splitter\ 5{:}95} \rightarrow \boldsymbol{fusão} \rightarrow \boldsymbol{splitter\ 1{:}8} \\
&\rightarrow \mathbf{2} * \boldsymbol{conector\ APC(cliente)}
\end{aligned}
\tag{10}
$$

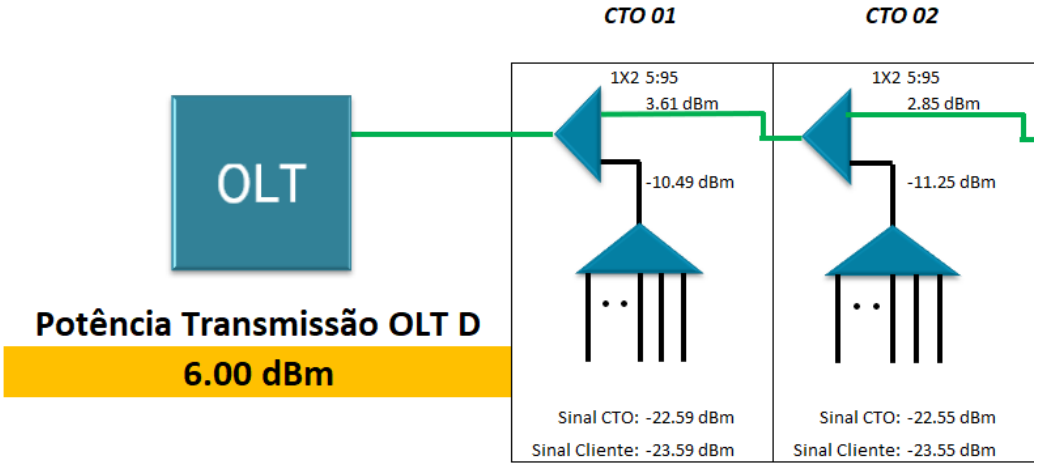
$$P_P = 4 * APC + 4 * fusão + 5.4 * 0.35 + 14.6 + 10.5$$

$$P_P = 4 * 0.3 + 4 * 0.1 + 1.89 + 25.1$$

$$P_P = 28.59\ dB$$

Para a primeira CTO temos um sinal da perda do enlace mais o sinal de emissão do módulo PON da OLT, +6 dBm -28.59 dB, -22.59 dBm. Na imagem abaixo temos a apresentação da planilha construída exibindo este mesmo valor na CTO, Figura 29:

Figura 29 - Planilha Excel com valores calculados de atenuação CTO-01.



Informações	Trecho A Entre DIO e 1º Splitter		Trecho B Entre 1º e 2º Splitter	
Distância do Trecho (Metros)	5395 M		743 M	
Sinal Entrada Splitter Desbalanceado	4.11 dBm		3.35 dBm	
Tipo Splitter Desbalanceado	5:95		5:95	
Atenuações nos Ramos	14.6	0.5	14.6	0.5
Sinal Saída Splitter Desbalanceado	-10.49 dBm	3.61 dBm	-11.25 dBm	2.85 dBm
Tipo Splitter CTO (Atendimento de clientes)	1:8		1:8	
Atenuação Splitter Balanceado	10.5		10.5	
Quantidade de Fusões Entre DIO ou Splitter e CTO	4	0.40 dB	2	0.20 dB
Quantidade de Conexões Entre CTO e Cliente	4	1.20 dB	2	0.60 dB
Sinal medido no splitter da CTO	-22.59 dBm		-22.55 dBm	

Fonte: Autoria própria (2020).

Nesta planilha o projetista preenche com as distâncias entre os trechos e o cálculo vai acontecendo por tentativa e erro, desde que tenha como objetivo deixar sinal dentro de um limite pré-estabelecido pela sensibilidade óptica da ONT, no caso definido -25 dBm. À medida que vai selecionando o tipo de *splitter* desbalanceado, quantidade de fusões que em nosso caso foi adotado um padrão de 2 (um na primeira CTO e outro no *splitter* desbalanceado seguinte dentro da próxima CTO) e assim foi sendo construída a rede, tal como se fosse uma linha de transmissão elétrica. A quantidade de conectores entre a CTO e o cliente foi de 2 do tipo *fast conector* APC.

Consultando o Apêndice A, página 63, é possível verificar todos os valores e sinais em todas as caixas de atendimento previstas nessa etapa de pré-projeto. Na Tabela 11 temos os níveis de sinais nas CTOs:

Tabela 11 - Sinal esperado da CTO no comissionamento da rede desbalanceada

Caixa de atendimento	Sinal mínimo esperado na CTO emissão OLT (SFP D) +6 dBm	Portas disponíveis
CTO-08-06-01	-22.69 dBm	8
CTO-08-06-02	-23.65 dBm	8
CTO-08-06-03	-21.12 dBm	8
CTO-08-06-04	-22.43 dBm	4
CTO-08-06-05	-23.09 dBm	8
CTO-08-06-06	-20.91 dBm	4
CTO-08-06-07	-24.04 dBm	8
CTO-08-06-08	-23.76 dBm	8
CTO-08-06-09	-23.63 dBm	8
CTO-08-06-10	-22.04 dBm	4
CTO-08-06-11	-23.79 dBm	8
Cliente Final	**-24.22 dBm**	**1**
	Total	**77**

Fonte: Autoria própria (2020).

3.4 ANÁLISE DE CUSTOS

Nesta análise não foram levados em conta os custos com alguns elementos da rede autossustentada como: ranhuras, arame isolado de espinar, dentre outros elementos básicos. Não foi levado em conta também o custo da OLT nem dos módulos SFP que compõe a rede PON.

Para compararmos os dois projetos foi feita uma pesquisa de mercado no dia 16 de novembro de 2020 e através do preço médio de 3 fornecedores diferentes: AngTech, Fibracem e Cianet. Foram obtidos estes custos de material, Figura 30 e Figura 31:

Figura 30 - Custo primário da rede balanceada

Produto	Qtde	Preço Un	Soma Parcial
Bobina As80 12fo Sm Monomodo 1700 Metros	1.00	R$ 4,449.00	R$ 4,449.00
Caixa de emenda 96FO - Fiberhome	1.00	R$ 247.00	R$ 247.00
CTO montada com splitter 1:16 balanceado	8.00	R$ 169.00	R$ 1,352.00
Splitter balanceado não conectorizado 1:8	4.00	R$ 37.90	R$ 151.60
Dio Distribuidor Optico 12fo Sc-apc Completo	1.00	R$ 439.00	R$ 439.00
		Total:	R$ 6,638.60

Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 31 - Custo primário da rede desbalanceada

Produto	Qtde	Preço Un	Soma Parcial
Bobina cabo ótico ASU 12FO 3KM - Fiberhome	6.00	R$ 5,890.00	R$ 35,340.00
Caixa de emenda 96FO - Fiberhome	1.00	R$ 247.00	R$ 247.00
CTO montada com splitter 1:8 balanceado	11.00	R$ 123.41	R$ 1,357.51
Splitter desbalanceado não conectorizado 5:95	4.00	R$ 37.90	R$ 151.60
Splitter desbalanceado não conectorizado 10:90	2.00	R$ 37.90	R$ 75.80
Splitter desbalanceado não conectorizado 15:85	2.00	R$ 37.90	R$ 75.80
Splitter desbalanceado não conectorizado 20:80	1.00	R$ 37.90	R$ 37.90
Splitter desbalanceado não conectorizado 35:65	1.00	R$ 37.90	R$ 37.90
Splitter desbalanceado não conectorizado 30:70	1.00	R$ 37.90	R$ 37.90
Dio Distribuidor Optico 12fo Sc-apc Completo	1.00	R$ 439.00	R$ 439.00
		Total:	R$ 37,800.41

Fonte: Autoria Própria (2020).

É possível observar que o custo de uma rede desbalanceada foi mais oneroso, dispêndio 500% maior, tanto no caso da distância que se pretendia atender, algo em torno de 15 km. É tecnicamente mais complicada de montá-la, pois foram utilizados diversos materiais diferentes entre si e, em campo, é preciso ter perícia e organização do técnico em telecomunicações que irá construí-la.

A rede desbalanceada também tem outra desvantagem, a sua topologia em linha. Caso aconteça um rompimento da fibra temos todo um braço de rede que se torna inoperante.

Neste modelo de rede, o alto custo teria que ser compensado de alguma forma através dos planos contratados junto ao provedor da internet ou com taxas de instalação, vai depender do tipo de contrato que o mesmo irá confeccionar.

A rede balanceada se mostrou tecnicamente mais simples de ser construída, teve um custo menor e tem à sua disposição uma quantidade de clientes em potencial maior.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No momento em que se iniciou este trabalho de conclusão de curso foi necessário o estudo para a fixação de conceitos físicos básicos inerentes ao funcionamento da tecnologia de fibra óptica assim como o comportamento da luz e das leis que governam seu funcionamento.

Este trabalho de conclusão atingiu o seu objetivo que era o desenvolvimento de guia metodológico através do passo a passo para a criação de uma rede óptica passiva. Foi descoberto na fase do desenvolvimento e do pré-projeto o quão este tema é bastante extenso e complexo, com inúmeros detalhes de uma rede óptica. Definir os pontos críticos da infraestrutura da instalação sem realmente estar *in loco* foi desafiador. É muito provável que estes pontos serão definidos pela equipe técnica durante a fase de execução, especificamente na fase do cordoalhamento da rede em via aérea. A ferramenta de imagem de satélite, Google Earth®, foi imprescindível para auxiliar no posicionamento das caixas de atendimento e no lançamento de cabos.

No projeto da rede desbalanceada, foi observado um custo 500% maior, sendo possível atender a até 77 clientes em uma região rural. Enquanto que numa rede balanceada em região urbana, é possível atender a até 128 clientes com um custo bem menor em relação à desbalanceada, pois pelos mesmos caminhos, consegue-se uma capilaridade maior da rede e se distribuir vários terminais PON diminuindo ainda mais os custos com uma futura expansão da rede.

Uma das limitações foi encontrar uma ferramenta de cálculo para criar uma rede desbalanceada de maneira mais intuitiva. Durante o desenvolvimento deste trabalho foi necessário o desenvolvimento de uma planilha em Excel® para auxiliar na fase de pré-projeto pois sem ela a escolha de *splitters* balanceados e desbalanceados para a continuação da rede de fibra óptica seria bastante dispendioso.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, Govind P. **Fiber-Optic Communication Systems**, third edition. New York: John Wiley & Sons, 2002.

AMAZONAS, José Roberto de Almeida. **Projeto de sistemas de comunicações ópticas,** 1 ed. Barueri, SP: Manole 2005.

ANATEL – **Agência Nacional de Telecomunicações**. Panorama Setorial de Telecomunicações Março/2020, Brasília, março, 2020. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/dados/relatorios-de-acompanhamento/2020#R2020_9>. Acesso em: 07 junho 2020.

CHOCHLIOUROS, Ioannis P. **Optical Access Networks and Advanced Photonics: Technologies and Deployment Strategies**, Hershey PA 17033, IGI Global 2010.

CIANET – **Redes FTTx: Entenda onde utilizar um splitter desbalanceado na sua rede.** <https://www.cianet.com.br/blog/infraestrutura-e-tecnologia/redes-fttx-entenda-onde-utilizar-um-splitter-desbalanceado-na-sua-rede>. Acesso em 16 novembro 2020.

CIANET – **Splitter: quando utilizar os modelos balanceado e desbalanceado**? < https://www.cianet.com.br/blog/infraestrutura-e-tecnologia/splitter-quando-utilizar-os-modelos-balanceado-e-desbalanceado/>. Acesso em 16 novembro 2020.

College Canon - **Como fotografar o pôr do sol** <https://college.canon.com.br/dicas/como-fotografar-o-por-do-sol-24>. Acesso em 16 novembro 2020.

COMITÊ GESTOR DA INTERNET NO BRASIL. **Ponto de troca de tráfego**. Tráfego total. Disponível em: <https://ix.br/agregado>. Acesso em: 13 julho 2020.

Furukawa - **Splitter óptico 1xn desbalanceado** <https://www.furukawalatam.com/pt-br/versao-et-pdf/splitter-optico-1xn-desbalanceado>. Acesso em 16 novembro 2020.

HALLIDAY, David. **Fundamentos de Física vol 4**, 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Santo Amaro da Imperatriz (SC) – Cidades e Estados <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/santo-amaro-da-imperatriz.html?>. Acesso em 16 novembro 2020.

ITU-T – **International Telecommunications Union** – Telecomunications. ITU-T Recommendation G.984.3 Amendment 1, 2018. Geneva, Mar, 2018. Disponível em: < https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3-200803-S/en>. Acesso em: 29 novembro 2020.

ITU-T – **International Telecommunications Union – Telecomunications**. ITU-T Recommendation G.984.5 Amendment 1, 2018. Geneva, May, 2018. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.5/en>. Acesso em: 07 junho 2020.

KEISER, Gerd Keiser. **Comunicações por fibras ópticas**, 4 ed. São Paulo: AMGH, 2014.

PINHEIRO, José Maurício dos Santos. **Redes Ópticas de Acesso em Telecomunicações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

RIBEIRO, José Antônio Justino. **Comunicações Ópticas,** 4 ed. São Paulo: Érica, 2009.

SILVEIRA, Fernando. **Física na Escola**, v. 9, n. 2, 2008. <https://www.if.ufrgs.br/~lang/Textos/Cores_Lua_Cheia.pdf>. Acesso 16 novembro 2020.

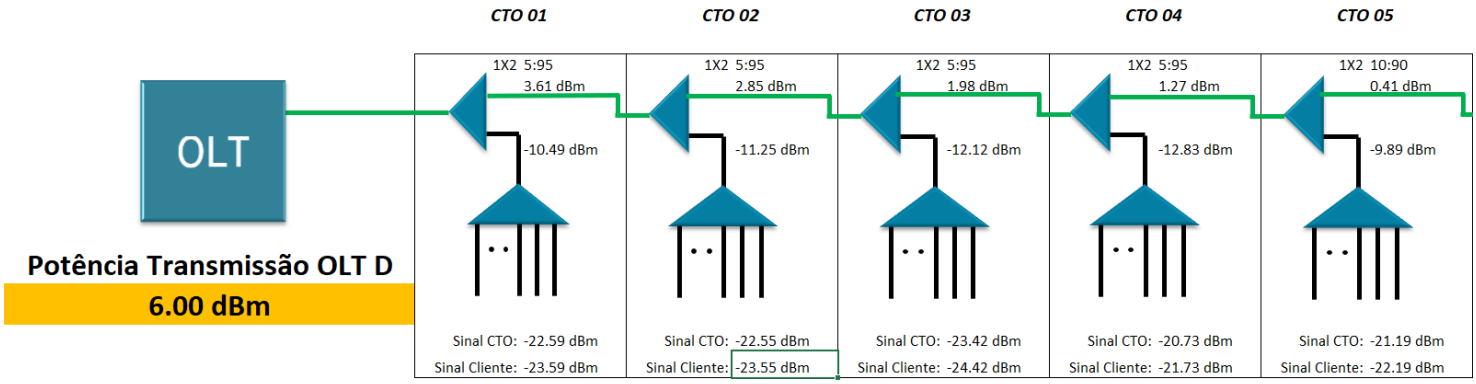
SIYAVULA - **Critical angles and total internal reflection** <https://intl.siyavula.com/read/science/grade-11/geometrical-optics/05-geometrical-optics-07>

TELECO - **Redes ópticas III: Perdas de Luz na Fibra Óptica**. <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialfoIII/pagina_2.asp>. Acesso 29 novembro 2020.

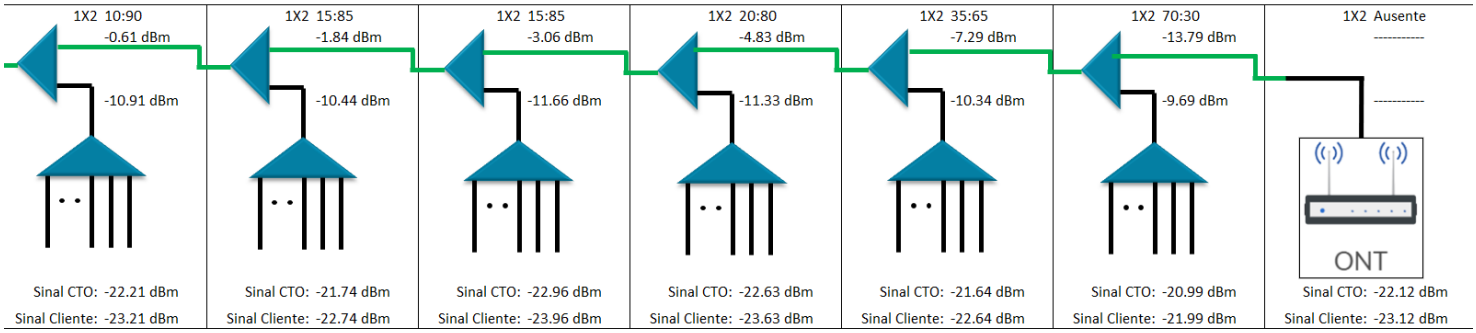
TELETIME **– PPPs levaram a aumento de velocidade da Internet na pandemia, diz Abrint** <https://teletime.com.br/23/11/2020/ppps-levaram-a-aumento-de-velocidade-da-internet-na-pandemia-diz-abrint/>. Acesso em 1 dezembro 2020.

TELETIME **- Tráfego da Internet no Brasil aumenta com impacto da covid-19 e IX.br passa de 11 Tbps** <https://teletime.com.br/12/05/2020/trafego-da-internet-no-brasil-aumenta-com-impacto-da-covid-19-e-ix-br-passa-de-11-tbps/>. Acesso 1 dezembro 2020.

APÊNDICE A — PLANILHA EXCEL PARA REDE DESBALANCEADA



Informações	Trecho A Entre DIO e 1º Splitter		Trecho B Entre 1º e 2º Splitter		Trecho C Entre 2º e 3º Splitter		Trecho D Entre 3º e 4º Splitter		Trecho E Entre 4º e 5º Splitter	
Distância do Trecho (Metros)	5395 M		743 M		1069 M		591 M		473 M	
Sinal Entrada Splitter Desbalanceado	4.11 dBm		3.35 dBm		2.48 dBm		1.77 dBm		1.11 dBm	
Tipo Splitter Desbalanceado	5:95		5:95		5:95		5:95		10:90	
Atenuações nos Ramos	14.6	0.5	14.6	0.5	14.6	0.5	14.6	0.5	11	0.7
Sinal Saída Splitter Desbalanceado	-10.49 dBm	3.61 dBm	-11.25 dBm	2.85 dBm	-12.12 dBm	1.98 dBm	-12.83 dBm	1.27 dBm	-9.89 dBm	0.41 dBm
Tipo Splitter CTO (Atendimento de clientes)	1:8		1:8		1:8		1:4		1:8	
Atenuação Splitter Balanceado	10.5		10.5		10.5		7.1		10.5	
Quantidade de Fusões Entre DIO ou Splitter e CTO	4	0.40 dB	2	0.20 dB	2	0.20 dB	2	0.20 dB	2	0.20 dB
Quantidade de Conexões Entre CTO e Cliente	4	1.20 dB	2	0.60 dB	2	0.60 dB	2	0.60 dB	2	0.60 dB
Sinal medido no splitter da CTO	-22.59 dBm		-22.55 dBm		-23.42 dBm		-20.73 dBm		-21.19 dBm	



Trecho F Entre 5º e 6º Splitter		Trecho G Entre 6º e 7º Splitter		Trecho H Entre 7º e 8º Splitter		Trecho I Entre 8º e 9º Splitter		Trecho J Entre 9º e 10º Splitter		Trecho K Entre 10º e 11º Splitter		Trecho L Entre 11º e 12º Splitter	
898 M		657 M		624 M		1051 M		478 M		1409 M		1252 M	
0.09 dBm		-0.84 dBm		-2.06 dBm		-3.43 dBm		-4.99 dBm		-7.79 dBm		-14.22 dBm	
10:90		15:85		15:85		20:80		35:65		70:30		Ausente	
11	0.7	9.6	1	9.6	1	7.9	1.4	5.35	2.3	1.9	6	----------	----------
-10.91 dBm	-0.61 dBm	-10.44 dBm	-1.84 dBm	-11.66 dBm	-3.06 dBm	-11.33 dBm	-4.83 dBm	-10.34 dBm	-7.29 dBm	-9.69 dBm	-13.79 dBm	----------	----------
1:8		1:8		1:8		1:8		1:8		1:8		1:4	
10.5		10.5		10.5		10.5		10.5		10.5		7.1	
2	0.20 dB	2	0.20 dB	2	0.20 dB	2	0.20 dB	2	0.20 dB	2	0.20 dB	2	0.20 dB
2	0.60 dB	2	0.60 dB	2	0.60 dB	2	0.60 dB	2	0.60 dB	2	0.60 dB	2	0.60 dB
-22.21 dBm		-21.74 dBm		-22.96 dBm		-22.63 dBm		-21.64 dBm		-20.99 dBm		-22.12 dBm	

Fonte: Autoria própria (2020).