



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS SOBRAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO**

**ADAIL MOREIRA ALBUQUERQUE**

**PROJETO E ANÁLISE DE UMA REDE GPON**

**SOBRAL**

**2018**

ADAIL MOREIRA ALBUQUERQUE

PROJETO E ANÁLISE DE UMA REDE GPON

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia da Computação do *Campus* Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito para à obtenção do grau de bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Me. Yuri Victor Lima de Melo

SOBRAL

2018

ADAIL MOREIRA ALBUQUERQUE

PROJETO E ANÁLISE DE UMA REDE GPON

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia da Computação do *Campus* Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito para à obtenção do grau de bacharel em Engenharia da Computação.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Yuri Victor Lima de Melo (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Eng. Me. Antonio Alan Rodrigues de Araújo  
Agil Engenharia de Telecomunicações

---

Especialista Mario Antonio Macedo de Sousa  
Sobral Net

A Deus e Nosso Senhor Jesus Cristo.

A minha Família: Meu pai José Valdir de Albuquerque Araújo, Minha Mãe Francisca Antonia Moreira Albuquerque, Meu irmão Adiby Moreira Albuquerque e Minha namorada Mariana Moreira da Costa.

À Edimaura Neves Bezerra e Manoel Maranguape de Queiroz Junior.

Ao Eng. Me. Antônio Alan Rodrigues de Araújo e família.



## AGRADECIMENTOS

A Deus e seu filho Nosso Senhor Jesus Cristo por me conduzir neste caminho tão árduo e me ofertar forças todos os dias para vencer os obstáculos da vida.

À minha família em nome de meu Pai José Valdir de Albuquerque Araújo, minha Mãe Francisca Antônia Moreira Albuquerque e meu grande irmão Adiby Moreira Albuquerque que sempre acreditaram em mim, fazendo valer todo meu esforço, confiando e realizando o impossível pra que chegasse até aqui.

À minha Linda namorada Mariana Moreira da Costa que sempre me apoiou e me incentivou a cada dia ser melhor e ultrapassar as difíceis barreiras impostas pelo o dia a dia. À sua família em nome de seu Pai Agostinho, sua Mãe Valfrida e sua irmã Marília.

À minha segunda família em nome de Edimaura Neves Bezerra e meu outro irmão Manoel Maranguape de Queiroz Júnior juntamente com sua namorada Carol e seu pai que desde o início, foram cruciais pra que eu lograsse êxito em toda a caminha da faculdade, Obrigado!

Ao Mestre Engenheiro Alan Araújo que me ajudou, me acolheu, me orientou muito bem desde o primeiro dia que entrei em contato. À sua família e empresa(Mestre Alan, Lorena, Carol, Jean e Heitor) por serem pessoas tão amigáveis e competentes que colaboram com minha formação todos os dias. Sinto-me muito feliz pelo o que vocês me proporcionam.

Ao Professor Yuri que aceitou o desafio de me orientar mesmo não sendo da área.

Às queridas professoras Joaquina Olímpio e Tia Joselena que desde sempre acreditaram, incentivaram e ajudaram de muitas formas pra que eu lograsse êxito na vida estudantil.

À galera da Banda de Música que em muitos momentos acadêmicos difíceis me passaram força e alegria por meio das brincadeiras e cachaçadas nas tocadas.

À galera da "calçada da fama"(Nebim, Jancarlos, Fajane, Samara, Bruna e Alice) que me apoiaram com o ombro amigo nos piores finais de semana que tive na vida universitária.

À galera da Turma 09 da Engenharia da Computação UFC Sobral que foi unida e esforçada para com seus objetivos. À melhor turma que o Huet Arruda já teve.

Aos amigos que conquistei durante essa jornada de estudos na universidade, sendo estes, amigos da Engenharia da Computação Engenharia Elétrica, Economia e Música.

Aos professores da Engenharia da Computação e Elétrica do Campus UFC em Sobral, pelas contribuições ao longo do curso. Sinto-me lisonjeado em ter sido Aluno de vocês.

Aos amigos das "pizzas"em Flat Sobral Mundi, por contribuir com vários momentos de diversão e estudos. Aos familiares e vizinhos que colaboraram direto ou indiretamente.

## RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso aborda desde os princípios fundamentais de um sistema de comunicação óptica, até o projeto de uma rede totalmente óptica na topologia *Gigabit Passive Optical Network*: Rede Óptica Passiva com capacidade Gigabit (GPON) Rede Óptica passiva Gigabit. A base teórica se inicia pelo fato de a luz ser uma onda eletromagnética comprovada por James Clerk Maxwell. Posteriormente, as leis básicas demonstram como a luz é guiada por longas distâncias em uma fibra óptica. Em seguida, há uma exposição das principais características das fibras ópticas, desde os tipos de fibras até as perdas e atenuações vinculadas a elas. Adiante, expõe as particularidades das *Passive Optical Network*: Rede Óptica Passiva (PON), analisando os principais indicadores para o futuro projeto de uma rede PON e é demonstrado os seus principais componentes que serão utilizados no projeto. E por final, o projeto prático de uma rede totalmente óptica em uma pequena cidade do interior do Ceará.

**Keywords:** Rede Óptica Passiva (PON). Rede Óptica Passiva com capacidade *Gigabit* (GPON).

## **ABSTRACT**

This term paper seeks to study since the fundamental principles of an optical communication system to the design of a fully optical network in the Gigabit Passive Optical Network topology. The theoretical basis begins with the fact that light is an electromagnetic wave proven by James Clerk Maxwell. After, the basic laws demonstrate how light is guided by long distances on an optical fiber. Then, there is an exposition of the main characteristics of optical fibers, since fiber types to losses and attenuations linked to them. In the foregoing, the particularities of the Passive Optical Network (PON), analyzing the main indicators for the future design of a PON network and demonstrates its main components that will be used in the project. And finally, the practical project of a fully optical network in a small city in the inner of Ceará.

**Keywords:** Passive Optical Network (PON). Gigabit Passive Optical Network (GPON).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico da quantidade de <i>bits</i> por segundo nos últimos dez anos no Brasil . . .	16
Figura 2 – Onda plana se propagando e polarizada linearmente. . . . .	21
Figura 3 – Representação gráfica da orientação de duas soluções possíveis para a equação de onda. . . . .	22
Figura 4 – Variação no espaço e no tempo de $\vec{E}(\vec{r}, t)$ de uma onda polarizada elipticamente.	23
Figura 5 – Espectro Eletromagnético. . . . .	23
Figura 6 – Representação de um raio de luz incidindo em um meio. . . . .	30
Figura 7 – (a) Situação a qual possui o ângulo crítico e (b) Situação que ocorre a reflexão total . . . . .	31
Figura 8 – Estrutura de uma fibra óptica com perfil índice degrau: (a) Perfil do índice de refração; (b) corte transversal da fibra; (c) corte longitudinal da fibra óptica.	33
Figura 9 – Fibra óptica com raios incidindo e cone de aceitação . . . . .	34
Figura 10 – Estrutura de uma fibra óptica com perfil índice gradual: (a) Perfil do índice de refração; (b) corte transversal da fibra; (c) corte longitudinal da fibra óptica.	35
Figura 11 – Sucessivas interfaces em degrau de uma fibra de índice gradual . . . . .	36
Figura 12 – Trajetórias dos raios em uma fibra de índice gradual . . . . .	37
Figura 13 – Representação vetorial dos modos . . . . .	38
Figura 14 – Atraso temporal das diferentes componentes espectrais . . . . .	41
Figura 15 – Diferença de tempo de propagação entre os dois modos: <i>Differential Group Delay</i> . . . . .	43
Figura 16 – Representação de um acoplador de fibra fundida . . . . .	48
Figura 17 – Rede de distribuição óptica . . . . .	52
Figura 18 – Terminal de linha óptico (LD 2502F) . . . . .	53
Figura 19 – DIO BT 48 24F SM SC-APC . . . . .	54
Figura 20 – Unidade de rede óptico FK-ONT-G420W . . . . .	54
Figura 21 – Splitter . . . . .	55
Figura 22 – Estrutura interna de um <i>Splitter</i> . . . . .	55
Figura 23 – Caixa de Emenda Óptica . . . . .	56
Figura 24 – Caixa de Terminação Óptica . . . . .	57
Figura 25 – Equipamento para realizar fusão . . . . .	58
Figura 26 – Conectores . . . . .	58

Figura 27 – a) Conector PC e APC b) Perfil do núcleo do tipo PC e c) Perfil do núcleo APC	59
Figura 28 – a) Polimento do Conector PC e b) Polimento do Conector APC . . . . .	59
Figura 29 – Composição de um cabo de fibra óptica. . . . .	60
Figura 30 – Cabos Ópticos . . . . .	61
Figura 31 – Princípio de funcionamento de um OTDR usando um circulador óptico . . .	66
Figura 32 – OTDR portátil . . . . .	66
Figura 33 – Power Meter . . . . .	68
Figura 34 – Localização do projeto FTTH . . . . .	70
Figura 35 – Coletas dos postes para o projeto FTTH . . . . .	72
Figura 36 – Células do projeto FTTH . . . . .	72
Figura 37 – Localização das CTO's do projeto FTTH . . . . .	73
Figura 38 – Localização das CEO's do projeto FTTH . . . . .	73
Figura 39 – Demarcação do <i>Backbone</i> do projeto FTTH . . . . .	74
Figura 40 – Demarcação da rede de distribuição do projeto FTTH . . . . .	75
Figura 41 – Padrão de cores utilizadas para organização das fibras ópticas. . . . .	76
Figura 42 – Organização dos cabos de seis e doze Fibras Ópticas. . . . .	76
Figura 43 – Contabilização da quantidade em metros de cada tipo de cabo óptico. . . . .	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características das topologias de rede EPON e GPON. . . . .	52
Tabela 2 – Nomenclatura de caracterização de cabos ópticos externos. . . . .	62
Tabela 3 – Nomenclatura de caracterização de cabos ópticos de acesso. . . . .	63
Tabela 4 – Quantitativo das relações. . . . .	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEO	Caixa de Emenda Óptica
DIO	Distribuidor Interno Óptico
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> : Densa Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda
EPON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i> : Rede Óptica Passiva com capacidade Gigabit
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> : União Internacional de Telecomunicações
NBR	Normas Brasileiras
OLT	<i>Optical Line Terminal</i> : Terminal de linha óptica
ONU	<i>Optical Network Unit</i> : Unidade de rede óptica
OTDR	<i>Optical Time-Domain Reflectometer</i> , Reflectômetro Óptico de Domínio do Tempo
PON	<i>Passive Optical Network</i> : Rede Óptica Passiva
RNP	Rede Nacional de Pesquisa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Contexto e Motivação</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Modelagem Matemática da Onda Eletromagnética</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Polarização da Onda Eletromagnética</b>	<b>20</b>
<b>2.2.1</b>	<i>Polarização Linear</i>	<b>20</b>
<b>2.2.2</b>	<i>Polarização Elíptica</i>	<b>21</b>
<b>2.2.3</b>	<i>Polarização Circular</i>	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>Espectro Óptico</b>	<b>23</b>
<b>2.4</b>	<b>Leis Básicas da Óptica</b>	<b>24</b>
<b>2.4.1</b>	<i>Índice de Refração</i>	<b>24</b>
<b>2.4.2</b>	<i>Reflexão e Refração</i>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>FIBRAS ÓPTICAS</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Fibra Óptica</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Perfis da fibra óptica</b>	<b>33</b>
<b>3.2.1</b>	<i>Step-index fibers: fibra de índice em degrau.</i>	<b>33</b>
<b>3.2.1.1</b>	<i>Abertura numérica para fibra índice degrau</i>	<b>33</b>
<b>3.2.2</b>	<i>Graded-index fiber: fibra de índice gradual.</i>	<b>35</b>
<b>3.2.2.1</b>	<i>Abertura numérica para fibra índice gradual</i>	<b>35</b>
<b>3.3</b>	<b>Modos de propagação</b>	<b>37</b>
<b>3.4</b>	<b>Dispersão de sinais em fibras</b>	<b>39</b>
<b>3.4.1</b>	<i>Dispersão Intermodal</i>	<b>39</b>
<b>3.4.2</b>	<i>Dispersão Intramodal</i>	<b>40</b>
<b>3.4.3</b>	<i>Dispersão do modo de polarização</i>	<b>43</b>
<b>3.5</b>	<b>Perdas em fibras ópticas</b>	<b>44</b>
<b>3.5.1</b>	<i>Atenuação por Absorção</i>	<b>44</b>
<b>3.5.1.1</b>	<i>Absorção por defeitos atômicos na composição do vidro</i>	<b>45</b>
<b>3.5.1.2</b>	<i>Absorção intrínseca pelos átomos-base constituintes do material da fibra</i>	<b>45</b>



3.5.1.3	<i>Absorção extrínseca por átomos de impureza no material</i>	45
3.5.2	<b>Atenuação por curvaturas</b>	45
3.5.2.1	<i>Microcurvaturas</i>	45
3.5.2.2	<i>Macrocurvaturas</i>	46
3.5.3	<b>Atenuação por espalhamento</b>	46
3.5.4	<b>Atenuação devido ao projeto do guia de onda</b>	47
3.6	<b>Acopladores ópticos</b>	47
3.6.1	<i>Características dos acopladores</i>	48
4	<b>REDE ÓPTICA PASSIVA</b>	51
4.1	<b>Rede EPON x GPON</b>	51
4.2	<b>Principais componentes</b>	52
4.2.1	<i>OLT</i>	53
4.2.2	<i>DIO</i>	53
4.2.3	<i>ONU</i>	54
4.2.4	<i>Splitter</i>	55
4.2.5	<i>CEO</i>	56
4.2.6	<i>CTO</i>	56
4.2.7	<i>Conectores</i>	57
4.2.8	<i>Cabos de Fibras Ópticas</i>	59
4.3	<b>Principais indicadores para um projeto de rede óptica passiva</b>	63
4.3.1	<b>Atenuação total</b>	64
4.3.1.1	<i>Técnica de corte</i>	64
4.3.1.2	<i>Método de perda de inserção</i>	64
4.4	<b>Equipamentos de Medidas</b>	65
4.4.1	<b>Reflectômetro óptico de domínio do tempo</b>	65
4.4.1.1	<i>Localizar falha na fibra óptica</i>	66
4.4.1.2	<i>Mensurar perda de retorno</i>	67
4.4.2	<i>Power Meter</i>	67
5	<b>PROJETO DE UMA REDE ÓPTICA DE AMPLITUDE MUNICIPAL</b>	69
5.1	<b>Premissas para o projeto da rede</b>	69
5.1.1	<i>Área de Atendimento</i>	69
5.1.2	<i>Tamanho das Células</i>	70

5.1.3	<i>Número de CTO's</i> . . . . .	70
5.1.4	<i>Número de Ramais ou CEO's</i> . . . . .	71
5.2	<b>Quantitativo das relações</b> . . . . .	71
5.3	<b>Procedimentos práticos FTTH</b> . . . . .	71
5.3.1	<i>Coleta dos Postes</i> . . . . .	71
5.3.2	<i>Definindo as Células</i> . . . . .	72
5.3.3	<i>Localização das CTO's</i> . . . . .	72
5.3.4	<i>Localização das CEO's</i> . . . . .	73
5.3.5	<i>Demarcação do Backbone</i> . . . . .	74
5.3.6	<i>Rede de Distribuição</i> . . . . .	74
5.3.7	<i>Rede de Atendimento</i> . . . . .	75
5.4	<b>Elaboração do Plano de Fusão</b> . . . . .	75
5.5	<b>Materiais utilizados</b> . . . . .	76
6	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	78
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	79
	<b>ANEXOS</b> . . . . .	80
	<b>ANEXO A</b> – Plano de Fusão . . . . .	81
	<b>ANEXO B</b> – Diagrama dos Ramais . . . . .	90
	<b>ANEXO C</b> – Materiais . . . . .	98

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto e Motivação

O setor de telecomunicações é parte fundamental da infraestrutura de qualquer país e é considerado, por isso, um componente relevante para o desenvolvimento econômico e social. Nos últimos anos, o número de serviços têm crescido exponencialmente, no entanto, para que possam ser disponibilizados, com maior qualidade, a um número crescente de usuários, é necessário a criação de projetos e utilização de sistemas de telecomunicações eficientes, tal como: comunicação óptica.

Comunicações utilizando luz surgiram há muito tempo na história do desenvolvimento no mundo. Os primeiros seres humanos faziam sinais com as mãos com o intuito de se comunicar e isso não deixa de ser uma comunicação óptica, mesmo que não funcione no escuro. Durante o dia, o sol é a fonte de luz para esse sistema: a informação é transportada do transmissor ao receptor pela radiação solar. Os movimentos da mão interrompem o fluxo luminoso, diminuindo a potência luminosa que chega ao receptor, isto é, aos olhos. Assim os olhos detectam a mensagem e o cérebro a processa (AMAZONAS, 2005).

Com o passar do tempo é natural que o ser humano necessite de tecnologias mais sofisticadas, e isso, não foi diferente para com suas técnicas de comunicação. A era das comunicações elétricas teve início em 1837 com a criação do telégrafo, por Samuel F.B. Morse (RODRIGUES FRANCISCO TEIXEIRA, 2015). Os aprimoramentos nesse tipo de comunicação e em seus meios de transmissão, continuaram, e no início da década de 1970, foi demonstrado por pesquisadores da Corning que era viável a produção de uma fibra de vidro com uma baixa perda de potência óptica, que seria suficiente para uma transmissão de informação por meio da luz na prática (AMERICA, 1995). Assim, até hoje os meios de transmissão estão sendo estudados para ser melhor usufruídos.

No final dos anos de 1970, foram construídas as primeiras conexões de fibra óptica para a transmissão de sinais de telefonia com uma taxa de 6 Mbp/s e com distância em torno dos 10 Km. De acordo com (ALTAHIR, 2017), a fibra óptica desempenha um papel importante na revolução das comunicações mundiais, pois a mesma é uma das tecnologias que possuem um enorme poder e qualidade de acesso.

Os primeiros experimentos que utilizaram fibra óptica para redes de acesso foram conduzidos a mais de 40 anos. O primeiro teste de campo com usuários finais foi instalado

próximo Nara, Japão em 1977. Nos anos seguintes, vários outros testes foram realizados em diversos países, incluindo Inglaterra, Alemanha, França, os EUA e o Canadá. Os testes foram tecnicamente um sucesso, mas os altos custos de instalação causaram um grande atraso na ascensão da fibra para ser o meio propagação do fluxo em redes de acesso. Como os componentes ópticos eram uma nova tecnologia e havia pouca fabricação, fazendo assim, os custos por assinante muito altos. As tecnologias concorrentes possuíam custos de instalação muito inferior, causando assim, um retardo no avanço deste tipo de rede.

Dez anos depois dos testes de comunicação baseados em fibra óptica pelo mundo, a Internet no Brasil conseguia dar seus primeiros passos, no ano de 1988, por meio de uma atuação cooperativa dos Ministérios da Ciência e Tecnologia e das Comunicações, que criaram a chamada Rede Nacional de Pesquisa (RNP). O interesse maior dos Ministérios era o desenvolver uma infra-estrutura mínima de serviços de Internet que abrangesse todo o território nacional.

No ano de 1995, iniciou a criação da Internet comercial no país, expandindo o acesso à internet a todos os setores da sociedade. A expansão da rede em todo o mundo, como também aqui no Brasil, se deve, principalmente, ao surgimento e ao desenvolvimento dos provedores que prestam o acesso a esse serviço.

Com o avanço tecnológico, surgiu a ideia de acesso por banda larga, uma mudança na forma de utilizar a Internet, uma vez que, tornou-se possível usar a rede mundial de computadores por um grande período de tempo, a custos menores e com uma velocidade bem superior ao acesso discado. Segundo pesquisas, o acesso à Internet por meio de banda larga tem crescido exponencialmente (SANTOS, 2013). Isto é comprovado pelo o gráfico da Figura 1 fornecido por IX.br<sup>1</sup>, que relaciona a quantidades de *bits* por segundo na pelos últimos dez anos no Brasil.

Com isso, este trabalho busca estudar o princípio de um sistema óptico de comunicação e projetar uma infraestrutura de rede baseada na topologia GPON em uma pequena cidade do Ceará. Este tipo de rede chega como inovação para os provedores de serviços de dados, principalmente, pois até então, as infraestruturas comum, baseados em cabos par trançado<sup>2</sup>, possuem limitações quanto a distância, capacidade e interferências. Segundo (NORDESTE, 2018), o mercado de banda larga fixa (internet fixa) no Ceará deve fechar 2018 com um crescimento médio de até 30%, se comparado a 2017.

<sup>1</sup> IX.br é o nome dado ao projeto do Comitê Gestor da Internet no Brasil (CGIbr) que promove e cria a infraestrutura necessária (Ponto de Intercambio de Internet - IXP) para a interconexão direta entre as redes que compõem a Internet Brasileira.

<sup>2</sup> Cabo par trançado: Cabo de cobre, trançado em pares. Fonte: [www.oficinadanet.com.br/post/10162-o-que-e-o-cabo-de-rede-par-trancado](http://www.oficinadanet.com.br/post/10162-o-que-e-o-cabo-de-rede-par-trancado)

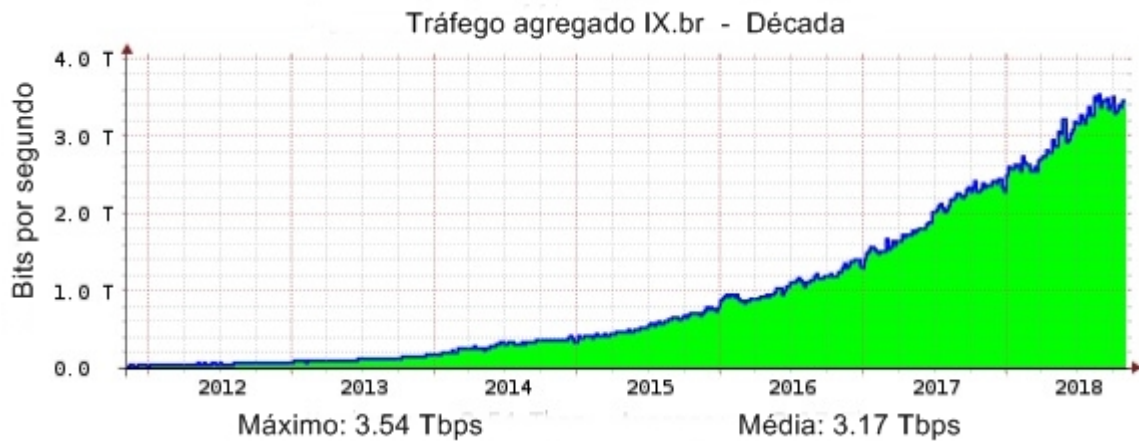


Figura 1 – Gráfico da quantidade de *bits* por segundo nos últimos dez anos no Brasil

Fonte: IX.br

Diante da alta demanda de banda, os sistemas baseados em fibra óptica se torna a melhor opção, uma vez que, estes proporcionam uma melhor qualidade dos serviços e com maior capacidade de transmissão. Outro ponto positivo quanto ao sistema óptico que será estudado é o custo benefício, pois a vida útil deste sistema será de 20 anos, acarretando assim, na ausência de manutenções constantes, fator intrínseco aos outros sistemas de provedores mais antigos.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é projetar uma rede óptica passiva gigabit, afim de modernizar o cenário atual dos provedores em Moraújo. Os objetivos específicos são:

- Estudar a formulação teórica do funcionamento de um sistema de comunicação óptica.
- Analisar a topologia de rede óptica escolhida, seus componentes e parâmetros.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho encontra-se dividido da seguinte maneira:

- **Capítulo 2:** Trata das teorias básicas referentes a fundamentação teórica sobre comunicações ópticas, tais como: polarização, espectro óptico e as principais leis da óptica.
- **Capítulo 3:** Apresenta as fibras ópticas, detalhando os perfis, modos de propagação, dispersões, perdas e equipamentos complementares.
- **Capítulo 4:** Descreve os principais componentes e indicadores das Redes Ópticas Passivas (PON).
- **Capítulo 5:** Expõe o projeto de uma rede GPON realizada no município de Moraújo,

situada no interior do Ceará.

- **Capítulo 6:** Evidencia as devidas conclusões do trabalho de conclusão de curso.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica para o entendimento do Trabalho de Conclusão de Curso. A Seção 2.1 introduz a modelagem matemática da onda eletromagnética. A Seção 2.2 introduz os tipos de polarização das ondas eletromagnéticas. Depois da fundamentação teórica a respeito das ondas eletromagnéticas, as Seções 2.3 e 2.4 apresentam o espectro óptico e as leis básicas da óptica, respectivamente.

### 2.1 Modelagem Matemática da Onda Eletromagnética

Os conceitos sobre a natureza da luz foram mudando diversas vezes ao longo dos tempos. Até o início do século 17, acreditava-se que a luz era um fluxo de minúsculas partículas emitido por uma fonte luminosa. A teoria afirmava que as partículas se propagavam em linhas retas e penetravam materiais transparentes, já em materiais opacos as partículas eram refletidas. A teoria em desenvolvimento conseguia explicar a reflexão e refração, entretanto o mecanismo da difração continuava sem solução. Em 1815, Fresnel conseguiu explicar a difração e mostrou que o caráter de propagação linear da luz poderia ser interpretado se assumisse que a luz move-se como uma onda.

Logo mais tarde, por volta de 1870, James Clerk Maxwell introduziu um conjunto de equações envolvendo os campos elétrico e magnético, colocando de forma clara as equações empíricas existentes na época. O mesmo introduziu o conceito de corrente de deslocamento, tornando a lei de Ampère mais geral. As ondas eletromagnéticas são substancialmente a propagação da radiação eletromagnética, que nada mais é, que a propagação perpendicularmente dos campos elétricos e magnéticos entre si. As Equações (2.1), (2.2), (2.3) e (2.4) apresentam a **Lei da indução de Faraday, Lei de Ampère-Maxwell, Lei de Gauss e Lei de Gauss para o magnetismo**, respectivamente.

Para o estudo sobre o princípio da equação de onda, assume-se que o material que uma onda irá percorrer seja dielétrico e isotrópico. Assim, as equações de Maxwell tomam as seguintes formas:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \implies \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \frac{\rho}{\epsilon} \implies 0 \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

onde  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  é a indução elétrica e  $\vec{B} = \mu \vec{H}$  corresponde a indução magnética, sendo  $\epsilon$  a permissividade e  $\mu$  a permeabilidade do meio. Considerando a propagação de ondas eletromagnéticas num meio com  $\rho = \vec{J} = 0$ ; sendo  $\rho$  a densidade de portadores livres e  $\vec{J}$  a densidade de corrente devida aos portadores livres. Tomando-se o rotacional da Equação (2.1), tem-se que:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\vec{\nabla} \times \left( \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \quad (2.5)$$

Utilizando a Equação (2.2) no termo final da Equação (2.5), e substituindo  $\vec{D}$  por  $\epsilon \vec{E}$ , tem-se que:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{H}) = -\epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Usando a identidade vetorial  $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$ , e o fato que é num meio livre e homogêneo,  $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ , chega-se em:

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

Utilizando o mesmo passo a passo que foi feito com a Equação (2.1), com a Equação (2.2), encontra-se:

$$\nabla^2 \vec{H} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$



Dessa forma, as Equações (2.7) e (2.8) são consideradas a forma padrão da equação da onda. Resumindo, uma onda eletromagnética possui três partes importantes:

1. **Amplitude:** No qual está ligada à intensidade, que determina a potência que está sendo transportada pela onda.
2. **Fase:** Que corresponde ao argumento da função exponencial que satisfaz as equações de ondas.
3. **Orientação espacial dos campos:** Que relaciona a orientação do campo elétrico e magnético no espaço.

## 2.2 Polarização da Onda Eletromagnética

Do ponto de vista da óptica física, as ondas eletromagnéticas que saem de uma pequena fonte óptica podem ser representadas por um trem de frentes de onda esférica com a fonte no centro. A frente de onda ou frente de fase, como pode ser chamado também, é o local em que todos os pontos do trem tem a mesma fase.

Quando um comprimento de onda da luz é muito menor que o objeto ou abertura que a encontra, as frentes de ondas surgem como linhas retas para essa abertura ou objeto. Assim, a onda de luz pode ser caracterizada como uma onda plana (KEISER, 2014).

A polarização de uma onda plana uniforme representa a forma e o lugar geométrico da extremidade do vetor  $\vec{E}$  no plano ortogonal à direção de propagação para um determinado ponto no espaço como uma função do tempo. Em outras palavras, pode-se dizer que a polarização de qualquer onda eletromagnética é determinada pelo comportamento temporal do vetor campo elétrico em um plano ortogonal à direção de propagação (ULABY, 2007; UFSC, ).

### 2.2.1 Polarização Linear

Os fatores  $\vec{E}_a$  e  $\vec{H}_a$  que definem as amplitudes dos respectivos campos, ao mudarem de direção no espaço e tempo determinam o estado de polarização da luz. Para analisar estes fatores, considera-se uma onda eletromagnética plana que pode ser representada nas formas:

$$\vec{E} = \vec{E}_a \exp\left(\pm i(\vec{K} \cdot \vec{r} - \omega t)\right) \quad (2.9)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_a \exp\left(\pm i(\vec{K} \cdot \vec{r} - \omega t)\right) \quad (2.10)$$

sendo  $\vec{K}$  direção de propagação da onda,  $\vec{r}$  vetor posição dado por  $\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$ ,  $\omega$  a frequência angular e  $t$  o tempo.

É comum em óptica especificar a polarização da onda como sendo a direção do campo elétrico no plano de polarização aquele que o contém. Se a onda vier se propagando na direção do observador, este verá o campo elétrico variando sobre um plano fixo conforme a Figura 2.

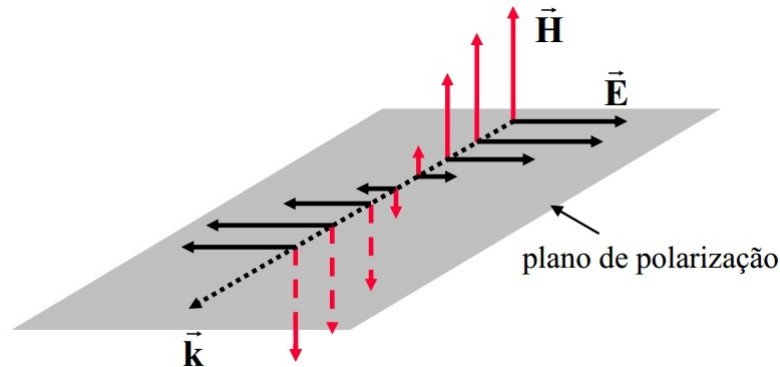


Figura 2 – Onda plana se propagando e polarizada linearmente.

Fonte: Livro Óptica Moderna Fundamentos e aplicações

A determinação do nome de um tipo de polarização, se dar pelo fato de como a projeção do vetor  $\vec{E}$  se descreve no plano, ou seja, se as amplitudes  $\vec{E}_a$  e  $\vec{H}_a$  são vetores reais e constantes, a polarização da onda é chamada linear.

### 2.2.2 Polarização Elíptica

Diferentemente da polarização linear, na polarização elíptica as amplitudes  $\vec{E}_a$  e  $\vec{H}_a$  dos devidos campos, são números complexos. Considere a soma de dois campos  $\vec{E}_1$  e  $\vec{E}_2$ , nas direções  $x$  e  $y$ , se propagando na direção de  $z$ . Ambos possuem a mesma frequência e vetor de onda, e são soluções possíveis da equação de onda, as diferenças são que eles estão rodados entre si de  $\pi/2$ , e possuem uma diferença de fase relativa  $\delta$  como ilustrado na Figura 3.

As duas soluções são linearmente independentes e, como tal, as combinações lineares delas fornecem outras soluções possíveis da equação de onda. O campo resultante é dado por:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = (E_{10}e^{i\delta}\hat{i} + E_{20}\hat{j}) \exp(i(Kz - \omega t)) \quad (2.11)$$

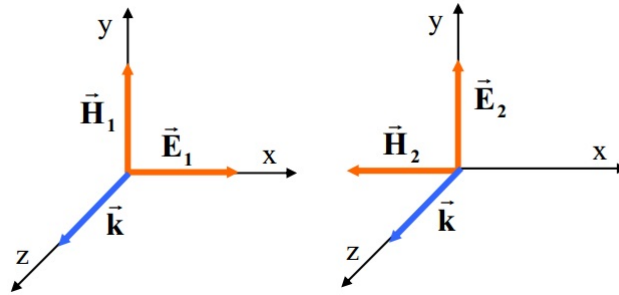


Figura 3 – Representação gráfica da orientação de duas soluções possíveis para a equação de onda.

Fonte: Livro Óptica Moderna Fundamentos e aplicações

A Equação (2.11) pode ser desmembrada da seguinte forma:

$$(E_{10}e^{i\delta} \cos(kz - \omega t))\hat{i} + (E_{10}e^{i\delta} i \sin(kz - \omega t))\hat{i} + (E_{20} \cos(kz - \omega t))\hat{j} + (E_{20}i \sin(kz - \omega t))\hat{j} \quad (2.12)$$

Tomando a primeira parte da Equação (2.12), ou seja, a direção  $\hat{i}$ , tem-se que:

$$(E_{10}e^{i\delta} \cos(kz - \omega t))\hat{i} + (E_{10}e^{i\delta} i \sin(kz - \omega t))\hat{i} \Rightarrow E_{10} \cos(Kz - \omega t + \delta)\hat{i} \quad (2.13)$$

Somando este resultado com a segunda parte da Equação (2.12), detém-se que:

$$\vec{E}(r,t) = E_{10} \cos(Kz - \omega t + \delta)\hat{i} + E_{20}(\cos(kz - \omega t) + i \sin(kz - \omega t))\hat{j} \quad (2.14)$$

Finalmente, tomando a parte real da Equação (2.14), chega-se em:

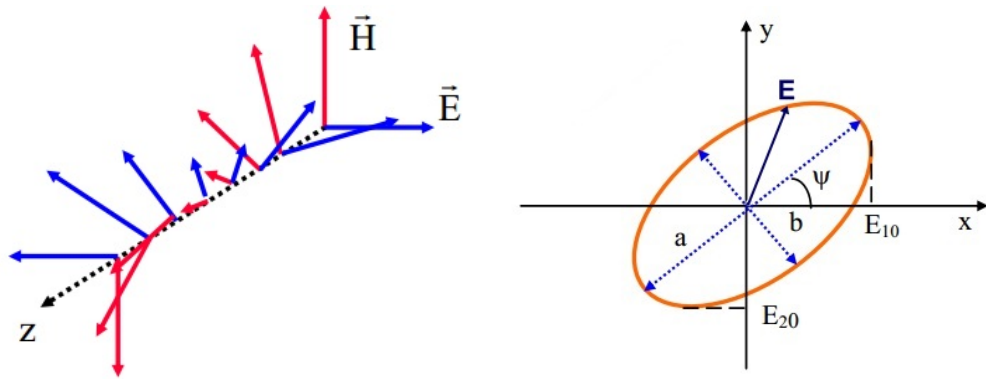
$$\vec{E}(r,t) = E_{10} \cos(Kz - \omega t + \delta)\hat{i} + E_{20} \cos(Kz - \omega t)\hat{j} \quad (2.15)$$

A variação no espaço e no tempo de  $\vec{E}(\vec{r},t)$  de uma onda polarizada elípticamente são ilustradas nas Figuras 4a e 4b.

### 2.2.3 Polarização Circular

A polarização circular é um caso particular da polarização elíptica, fazendo  $\delta = \pm\pi/2 + 2m\pi$ , onde ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) e  $E_{10} = E_{20} = E_0$ , tem-se que:

$$E_1^2 + E_2^2 = E_0^2 \quad (2.16)$$



(a) Onda plana com polarização elíptica. (b) Projeção do vetor  $\vec{E}$  no plano  $xy$ .

Figura 4 – Variação no espaço e no tempo de  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  de uma onda polarizada elipticamente.

Fonte: Livro Óptica Moderna Fundamentos e aplicações

sendo que  $E_1 = E_0 \cos \omega t$  e  $E_2 = \pm E_0 \sin \omega t$ . Assim, a projeção do vetor  $\vec{E}$  que formava uma elipse se modifica para uma circunferência (ZILIO, 2009).

### 2.3 Espectro Óptico

As ondas eletromagnéticas que possuem frequências dentro da faixa de luz visível, ou seja, entre infravermelho e ultravioleta podem utilizar os termos óptica e luz. Dessa forma, a comunicação óptica possui bandas espectrais designadas pela *International Telecommunication Union*: União Internacional de Telecomunicações (ITU), designou seis bandas espectrais na região  $1.260nm - 1.675nm$  para o uso em comunicações por fibra óptica. Essas bandas são divididas levando em consideração as características de atenuação das fibras ópticas. A Figura 5 ilustra o espectro eletromagnético.

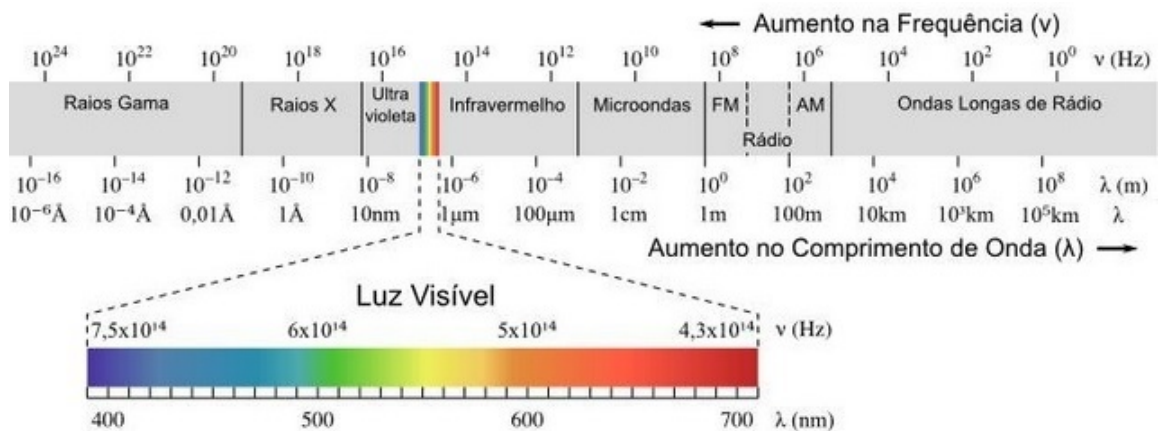


Figura 5 – Espectro Eletromagnético.

Fonte: <http://dan-scientia.blogspot.com/2010/03/relacao-da-frequencia-com-o-comprimento.html>

## 2.4 Leis Básicas da Óptica

Após a definição da luz nas seções anteriores, torna-se importante apresentar suas principais grandezas e leis. Duas grandezas importantes são frequência e comprimento de onda. A frequência  $f$  pode ser definida como o número de ciclos completos que ocorrem por unidade de tempo transcorrido, cuja unidade para um segundo é o hertz. Já o comprimento de onda  $\lambda$ , é a distância entre duas cristas ou dois vales de uma determinada onda. A relação entre essas duas grandezas é possível devido a contribuição de Maxwell que determinou que a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo  $c$  é igual a  $3 \times 10^8 m/s$ , o que corresponde à mesma velocidade já obtida para a propagação da luz. Portanto, a Equação (2.17) relaciona tais grandezas.

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.17)$$

Uma vez que a velocidade de propagação de uma onda no vácuo  $c$ , é dada pela seguinte razão:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299.792.458 m/s \quad (2.18)$$

onde a permeabilidade  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$  e a permissividade  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} F/m$ . Maxwell calculou a velocidade  $c$  a partir dos valores conhecidos de  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  e obteve um resultado praticamente idêntico à velocidade da luz medida nos experimentos de Fizeau.

Num material homogêneo e isotrópico pode-se ainda usar as equações de Maxwell, porém troca-se o  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  pela permissividade elétrica  $\epsilon$  e permeabilidade magnética  $\mu$  do referido meio (SANTOS, 2011). Dessa forma, a velocidade de uma onda eletromagnética  $v$  no meio homogêneo e isotrópico pode ser dada pela seguinte equação:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (2.19)$$

### 2.4.1 Índice de Refração

Pela Equação (2.19), nota-se a dependência da velocidade de uma onda eletromagnética com as características elétricas e magnéticas do material. Dessa forma, pela teoria de Maxwell torna-se possível calcular o índice de refração a partir das propriedades elétricas e

magnéticas de um determinado material. Sendo tal material isotrópico e homogêneo o índice de refração é definido como:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.20)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $v$  a velocidade da luz no referido material.

Tendo como base as Equações (2.18), (2.19) e (2.20) obtém-se outra forma de determinar o índice de refração de um meio:

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} \quad (2.21)$$

onde a permissividade elétrica  $\epsilon$  e a permeabilidade magnética  $\mu$  podem ser determinadas das seguintes formas:

$$\epsilon = \epsilon_0(1 + \chi_e), \quad \mu = \mu_0(1 + \chi_m) \quad (2.22)$$

sendo  $\chi_e$  e  $\chi_m$  as susceptibilidades elétrica e magnética do material.  $\chi_e$  mensura o quão fácil um material se polariza ao ser imposto a um campo elétrico, enquanto  $\chi_m$  mensura a capacidade que um material tem em magnetizar-se sob uma estimulação magnética a qual é submetido. Em outras palavras, as susceptibilidades caracterizam a polarização elétrica e a magnetização que os campos eletromagnéticos produzem no meio.

Pode-se definir a polarização elétrica  $\vec{P}$  de um dielétrico como momento de dipolo elétrico por unidade de volume do meio, que é dado por:

$$\vec{P} = \epsilon_0\chi_e\vec{E} \quad (2.23)$$

e a magnetização  $\vec{M}$ , ou seja, momento magnético por unidade de volume do meio dada por:

$$\vec{M} = \chi_m\vec{H} \quad (2.24)$$

sendo  $\vec{H}$  o campo magnético definido por:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (2.25)$$

e  $\vec{B}$  a indução magnética.

Também é importante definir outra maneira de representar o índice de refração. Desse modo, é possível caracteriza-lo por meio da permissividade e permeabilidade relativa que são dadas por:

$$K_e = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = (1 + \chi_e), K_m = \frac{\mu}{\mu_0} = (1 + \chi_m) \quad (2.26)$$

Assim, o índice de refração também pode ser escrito como:

$$n = \sqrt{K_e K_m} \quad (2.27)$$

Em geral, o módulo da susceptibilidade magnética  $\chi_m$  nos materiais diamagnéticos ou paramagnéticos é muito menor que 1. Com isso, os efeitos magnéticos são muito pequenos. Sabendo que a fibra é um material dielétrico estes efeitos são ainda menores. Dessa forma, pode-se dizer que  $\chi_m \approx 0$ ,  $\mu \approx \mu_0$  e  $K_m \approx 1$ . Desse modo, pode se definir:

$$n = \sqrt{K_e} \quad (2.28)$$

esta igualdade é conhecida como a relação de Maxwell.

Segundo (SANTOS, 2011), a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética dependem da frequência da oscilação eletromagnética. Dessa maneira, isso significa que o índice de refração também depende da frequência, conforme foi demonstrado por Newton em seus experimentos de dispersão da luz solar em um prisma. Um modelo matemático que descreve muito bem a variação do índice de refração com a frequência foi definido por Lorentz.

De início, considera-se que um átomo esteja sujeito à influência de uma onda eletromagnética, onde  $F_e$  é a força elétrica dado por:

$$F_e = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2.29)$$

enquanto a força magnética  $F_m$  é definida como:

$$F_m = \frac{q^2 \mu_0 v_c^2}{4\pi r^2} \quad (2.30)$$

A razão entre as forças elétrica e magnética sobre uma determinada carga  $q$  dentro de um átomo é:

$$\frac{F_e}{F_m} = \frac{1/\epsilon_0}{\mu_0 v_c^2} \Rightarrow v_c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \quad (2.31)$$

onde  $v_c$  é a velocidade da carga no plano perpendicular ao campo magnético. Com esse resultado, pode-se perceber que a força elétrica numa determinada carga  $q$  é maior que a força magnética por um fator igual a velocidade da luz no vácuo. Assim, a força magnética pode ser desprezível frente a força elétrica, já que ( $F_m \ll F_e$ ).

Os elétrons que formam a nuvem eletrônica de um átomo estão ligados ao núcleo por forças elétricas que mantêm o sistema em uma configuração de equilíbrio. A força sobre os elétrons pode ser bastante complicada; com o intuito de simplificar a situação, considera-se que cada elétron está ligado ao átomo por uma força elástica do tipo  $F = -Kx$

onde o  $K$  representa a constante elástica e  $x$  representa o deslocamento do elétron em relação a sua posição de equilíbrio no átomo. Outro aspecto importante é a frequência de ressonância do elétron já que este se comporta como um oscilador harmônico cuja sua frequência natural ou frequência harmônica é dada por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m_e}} \quad (2.32)$$

onde  $m_e$  equivale a massa do elétron.

No momento em que uma onda eletromagnética de frequência  $\omega$  incide em um átomo, o campo elétrico produz uma força sobre o elétron que é dada pela seguinte Equação:

$$F_e = q_e E(t) = q_e \cos(\omega t) \quad (2.33)$$

onde  $q_e$  é a carga do elétron. Como já foi mencionado anteriormente a força magnética pode ser desprezada, de maneira que equação de movimento do elétron dada pela segunda lei de Newton é da forma:

$$F_e = m_e \frac{d^2x}{dt^2} = -m_e \omega_0^2 x + q_e E_0 \cos(\omega t) \quad (2.34)$$



Uma solução para Equação acima é a seguinte:

$$x(t) = x_0 \cos(\omega t) \quad (2.35)$$

Ao substituir a Equação (2.35) na Equação (2.34), tem-se que:

$$-m_e x_0 \omega^2 \cos(\omega t) = q_e E_0 \cos(\omega t) - m_e x_0 \omega_0^2 \cos(\omega t) \quad (2.36)$$

isolando  $x_0$ ,

$$x_0 = \frac{q_e E_0}{m_e(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.37)$$

Dessa forma, pode-se determinar o movimento do elétron no tempo como:

$$x(t) = \frac{q_e E_0}{m_e(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos(\omega t) = \frac{q_e}{m_e(\omega_0^2 - \omega^2)} E(t) \quad (2.38)$$

Considerando que a contribuição de um elétron para o momento de dipolo do átomo é  $q_e x$  e esse momento de dipolo  $M_d$  do átomo é a soma das contribuições dos seus  $Z$  elétrons, então pode-se concluir que:

$$M_d = Z q_e x = \frac{Z q_e^2}{m_e(\omega_0^2 - \omega^2)} E \quad (2.39)$$

Agora considerando não somente um átomo, mas  $N$  átomos por unidade de volume, a polarização produzida pela onda eletromagnética é:

$$P = N M_d = N Z q_e x = \frac{N Z q_e^2}{m_e(\omega_0^2 - \omega^2)} E \quad (2.40)$$

Por meio da Equação (2.40) acima, pode-se calcular a susceptibilidade elétrica, pois esta, estar relacionada com a polarização dada pela Equação (2.14). Com isso, tem-se que:

$$\chi_e = \frac{P}{\epsilon_0 E} = \frac{N Z q_e^2}{m_e \epsilon_0 (\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.41)$$

como também a permissividade elétrica,

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \chi_e) = \varepsilon_0 + \frac{NZq_e^2}{m_e(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.42)$$

Correlacionando a Equação (2.42) com a primeira igualdade  $K_e$  situada nas Equações (2.26) e por fim, substituir na relação de Maxwell, Equação (2.28), chega-se em:

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{NZq_e^2}{m_e\varepsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.43)$$

Para que o índice de refração fique completamente em termos da frequência, precisa-se de um conceito chamado de frequência de plasma  $\omega_p$  que consiste na oscilação dos elétrons livres em torno de suas respectivas posições de equilíbrio. Essa frequência pode ser dada pela Equação (2.44), a seguir:

$$\omega_p^2 = \frac{NZq_e^2}{m_e\varepsilon_0} \quad (2.44)$$

Com isso, finalmente tem-se que o índice de refração em termos da frequência:

$$n(\omega) = \sqrt{1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2}} \quad (2.45)$$

Desta maneira conclui-se que o índice de refração é uma função da frequência conforme foi mencionado anteriormente (SANTOS, 2011).

### 2.4.2 Reflexão e Refração

Outros conceitos relevantes para progressão deste trabalho, é a reflexão e refração. Analisando a Figura 6 para melhor interpretar os conceitos, tem-se que um raio de luz se propaga em um determinado meio A, e esse incide em outro meio B de composição diferente; parte do raio de luz original é refletido para o meio A e a outra parte refratada no meio B, conforme mostra a Figura 6.

A refração do raio de luz no meio material B, é um resultado da diferença de velocidade da luz nos dois materiais que possuem índices de refração diferentes. A lei de Snell

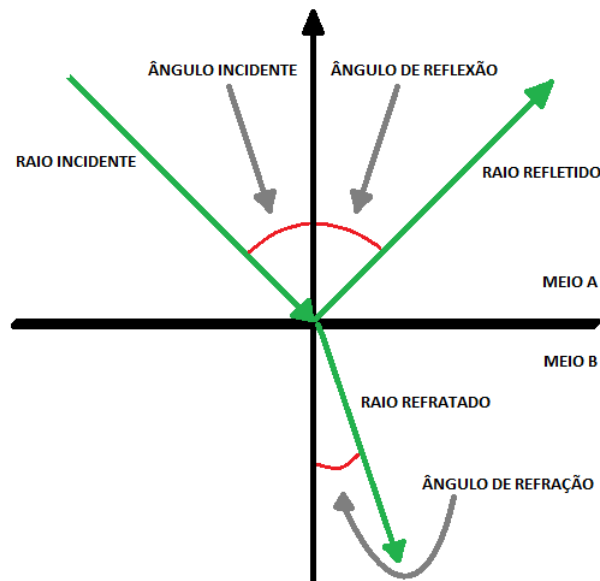


Figura 6 – Representação de um raio de luz incidindo em um meio.  
Fonte: Próprio Autor

ou lei da refração correlaciona o seno do ângulo incidente  $\theta_1$  e o seno do ângulo refratado  $\theta_2$  com os índices de refração  $n$  dos meios A e B. Desse modo, ela é dada por:

$$n_A \cdot \sin(\theta_1) = n_B \cdot \sin(\theta_2) \quad (2.46)$$

Isolando os termos semelhantes, essa lei exibi uma relação importante referente aos índices de refração de cada meio e ângulo crítico  $\theta_c$ . Desse modo, a Equação (2.46) resulta em:

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_B}{n_A} = \sin(\theta_c) \quad (2.47)$$

As principais características dos raios de luz na Figura 6 após ocorrer a refração e a reflexão são: o raio refletido preserva a sua frequência e a velocidade de propagação, enquanto o raio refratado, preserva somente a sua frequência, uma vez que mudará a direção e a velocidade de propagação com relação a onda de luz inicial.

Sendo assim, o ângulo de incidência irá ser maior ou menor do que o ângulo de refração, visto que isto está diretamente ligado ao índice de refração específico do material a qual é composto cada meio (PLA, 2011).

Quando a luz viaja em um meio e esta é refletida por um meio material com índice de refração maior, ou seja, um meio com índice de refração mais elevado que o outro, esse processo

é chamado de reflexão externa. Por outro lado, quando a luz é refletida por um material que possui o índice de refração menor que o outro meio, o processo é chamado de reflexão interna.

O processo de reflexão interna é o princípio científico de operação da fibra óptica, dado que uma onda de luz só será guiada, se a reflexão interna total ocorrer. Esse fenômeno só irá acontecer quando o ângulo de incidência for maior que o ângulo crítico  $\theta_c$ , que pode ser obtido por meio da equação (2.47).

Analisando a Figura 7 (a), tem-se que nessa primeira situação o ângulo de refração é  $\pi/2$ , e pela lei de Snell-Descartes, o ângulo de incidência deve ser igual ao ângulo crítico, já que o raio de luz é refratado paralelamente a superfície entre os meios. Já na parte (b), o ângulo de incidência é maior que o ângulo crítico, ou seja, um ângulo ideal para que não ocorra mais refração. Isso se dá por conta do material que é menos denso opticamente, reflete a luz completamente se tratando de uma situação ideal.

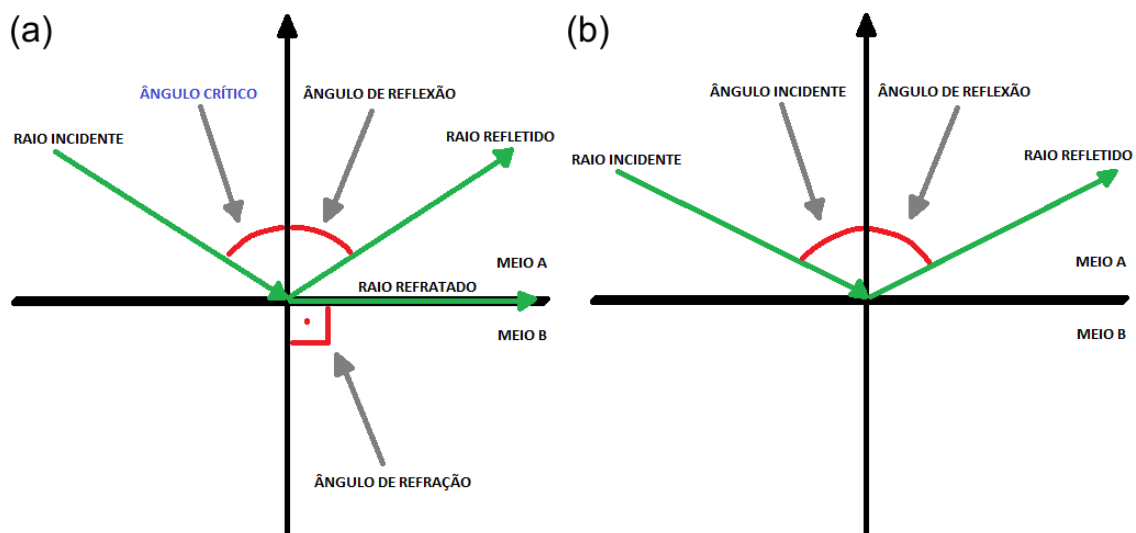


Figura 7 – (a) Situação a qual possui o ângulo crítico e (b) Situação que ocorre a reflexão total  
Fonte: Próprio Autor

### 3 FIBRAS ÓPTICAS

Este capítulo busca elucidar as principais características e os tipos de fibras ópticas, como também definir algumas relações importantes. A Seção 3.1 conceitua fibra óptica, enquanto as Seções 3.2 e 3.3 apresentam os perfis e modos de propagação das fibras. O capítulo é finalizado através das Seções 3.4 até 3.6, onde apresentam as dispersões das fibras, perdas das fibras e acopladores.

#### 3.1 Fibra Óptica

A fibra óptica é um filamento composto basicamente de um material dielétrico (Sílica  $\text{SiO}_2$  ou plástico), em uma estrutura cilíndrica transparente, flexível de dimensões microscópicas, que possui uma região central, chamada núcleo, envolta de uma camada, também de material dielétrico, chamada casca. Tal filamento possui a habilidade de confinar a energia eletromagnética na forma de luz dentro de sua superfície e guia-lá em uma direção paralela a seu eixo.

A fibra óptica proporciona grande capacidade de transmissão, pois transportar uma grande multiplicidade de informações que podem ser requeridas em diversas aplicações contemporâneas (e.g. HDTV, jogos online e serviços médicos).

As propriedades de transmissão de uma fibra óptica são estabelecidas pelas características estruturais da mesma, pois estas têm um efeito importante na determinação de como um sinal óptico é afetado ao se propagar ao longo da fibra. A estrutura em si, estabelece a capacidade de transportar informação e como também influencia a resposta da própria fibra óptica a perturbações ambientais (AGRAWAL, 2014; KEISER, 2014).

Há três tipos de fibras ópticas e pode-se distingui-las pelas propriedades físicas:

1. **Fibra de óptica de índice degrau:** fibra do tipo multimodo com núcleo entre  $30 - 100\mu\text{m}$  e diâmetro da casca  $125\mu\text{m} \pm 2\mu\text{m}$ .
2. **Fibra óptica de índice gradual:** fibra do tipo multimodo com núcleo entre  $20 - 50\mu\text{m}$  e diâmetro da casca  $125\mu\text{m} \pm 2\mu\text{m}$ .
3. **Fibra óptica de único modo:** fibra do tipo monomodo com núcleo entre  $8.6 - 9.5\mu\text{m}$  e diâmetro da casca  $125\mu\text{m} \pm 2\mu\text{m}$ .

## 3.2 Perfis da fibra óptica

A característica principal quanto ao comportamento do índice de refração na interface núcleo-casca, é o que difere os perfis da fibra óptica. Os perfis estão descritos a seguir.

### 3.2.1 *Step-index fibers: fibra de índice em degrau.*

Este perfil de fibra é denominada dessa forma porque possui uma brusca transição do índice de refração na interface núcleo-casca. A Figura 8 ilustra esse tipo de fibra.

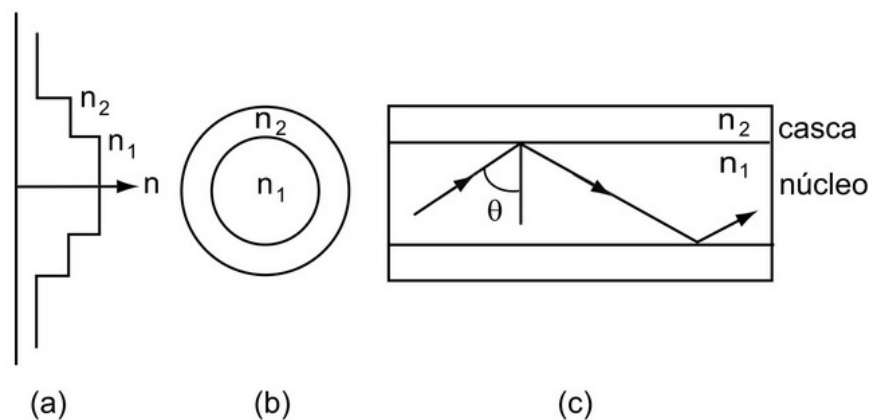


Figura 8 – Estrutura de uma fibra óptica com perfil índice degrau: (a) Perfil do índice de refração; (b) corte transversal da fibra; (c) corte longitudinal da fibra óptica.

Fonte: Livro Projeto de Sistemas de Comunicações Ópticas

#### 3.2.1.1 *Abertura numérica para fibra índice degrau*

Considerando a geometria descrita na Figura 9, esta possui um raio de luz incidindo no núcleo da fibra sendo que este faz um ângulo  $\theta_{in}$  com o eixo central maior que  $\theta_a$ . Analisando, tem-se que este raio chega até a casca, mas não é refletido totalmente, pois parte dele é refrata na superfície que separa núcleo da fibra e casca. Assim, o raio de luz incidente não sofre a reflexão interna total. Como a fibra óptica tem estrutura cilíndrica, ela apresenta uma simetria de revolução e assim, seu ângulo de aceitação  $\theta_a$  coincide com o chamado cone de aceitação. Estas afirmações podem ser observadas na Figura 9.

Aplicando a lei de Snell-Descartes na interface ar-núcleo, a condição posta pela Equação (2.47) pode ser relacionada com o ângulo máximo de entrada,  $\theta_{in,max}$ , que é denominado

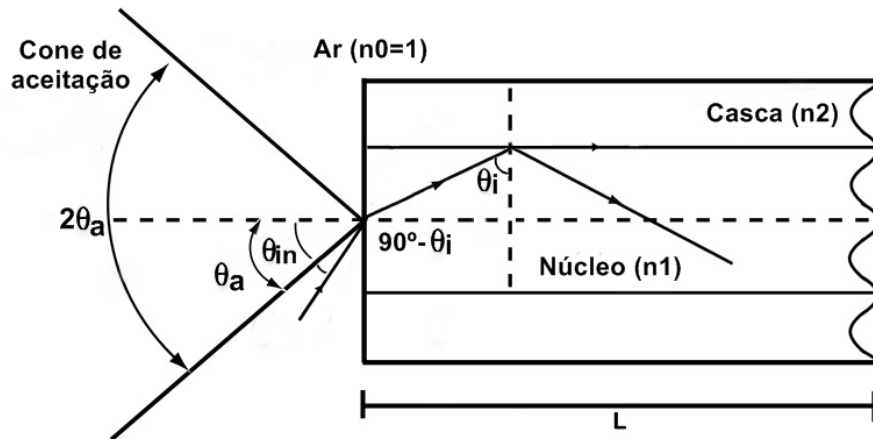


Figura 9 – Fibra óptica com raios incidindo e cone de aceitação  
 Fonte: Adaptado do Livro Projeto de Sistemas de Comunicações Ópticas

ângulo de aceitação  $\theta_a$ . Assim, pode-se escrever:

$$n_0 \sin(\theta_{in,max}) = n_0 \sin(\theta_{in}) = n_1 \sin(90^\circ - \theta_i) \implies n_1 \sin(\theta_c) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.1)$$

onde  $\theta_c$  é  $\frac{\pi}{2} - \theta_i$ .

Sendo assim, os raios de luz com ângulos de entrada inferiores a  $\theta_a$  sofrem a reflexão interna total na interface núcleo-casca. Pode-se dizer também que o ângulo  $\theta_a$  define o cone de aceitação de uma fibra óptica.

A Equação (3.1) define a abertura numérica  $AN$  de uma fibra com o perfil de índice degrau como:

$$AN = n_0 \sin(\theta_a) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.2)$$

A abertura numérica de uma fibra óptica pode ser definida em função da diferença relativa de índices de refração ( $\Delta$ ). Este parâmetro é definido para os dois perfis de fibra óptica da seguinte forma:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (3.3)$$

Substituindo a Equação (3.3) na Equação (3.2), tem-se que:

$$AN = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (3.4)$$

Em vários casos práticos,  $n_1 \approx n_2$ , o que resulta em  $\Delta \ll 1$ . Assim,  $\Delta$  pode ser aproximado pela seguinte Equação (3.5):

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3.5)$$

Na prática, a abertura numérica nada mais é do que uma medida da capacidade de uma fibra óptica captar e transmitir luz. Quanto maior essa abertura, maior será o ângulo de aceitação da fibra, fazendo assim, que mais potência luminosa seja acoplada à fibra óptica. Para que se tenha uma abertura numérica maior, é necessário que aumente a diferença ( $n_1 - n_2$ ).

### 3.2.2 Graded-index fiber: fibra de índice gradual.

Este perfil de fibra é denominada dessa forma, porque o índice de refração varia gradualmente do centro da fibra(núcleo) para a casca. A Figura 10 ilustra esse tipo de fibra.

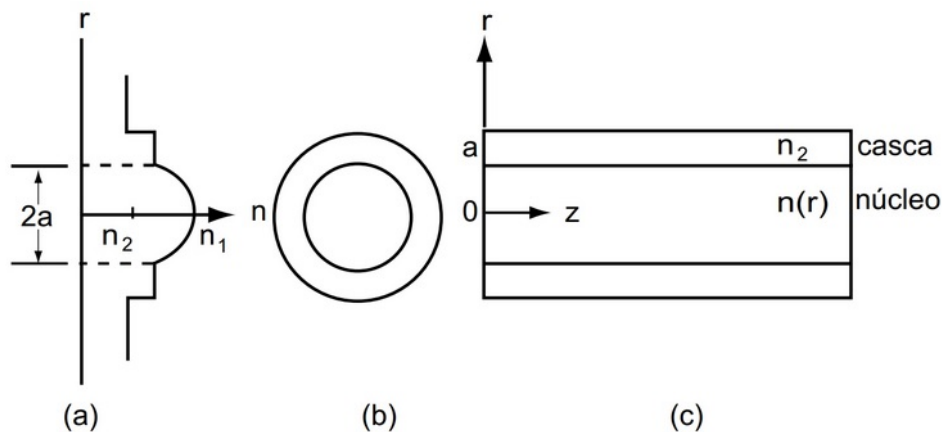


Figura 10 – Estrutura de uma fibra óptica com perfil índice gradual: (a) Perfil do índice de refração; (b) corte transversal da fibra; (c) corte longitudinal da fibra óptica.

Fonte: Livro Projeto de Sistemas de Comunicações Ópticas

#### 3.2.2.1 Abertura numérica para fibra índice gradual

As fibras ópticas com esse perfil, têm o núcleo constituído por um material cujo índice de refração varia com a distância ao eixo da fibra, conforme ilustra a Figura 10. A variação do índice de refração é dada por meio das expressões:



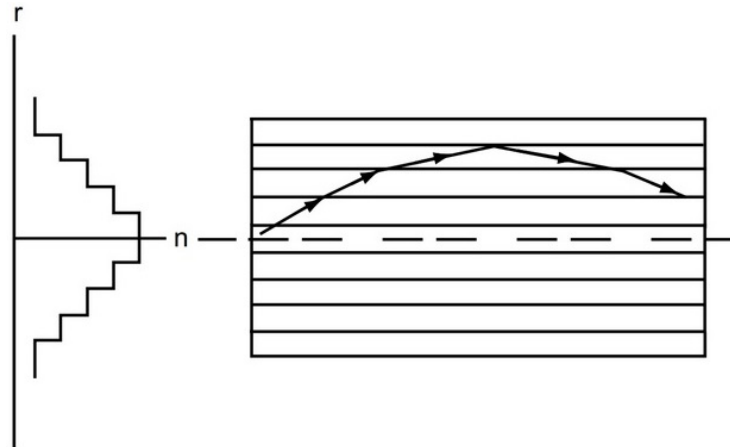


Figura 11 – Sucessivas interfaces em degrau de uma fibra de índice gradual  
 Fonte: Adaptado do Livro Projeto de Sistemas de Comunicações Ópticas

- Se  $r \leq a$ :

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \quad (3.6)$$

- Se  $r > a$ :

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} \quad (3.7)$$

sendo que  $a$  é o raio do núcleo da fibra e  $\alpha$  é o parâmetro que descreve a variação do perfil de índice de refração.

As trajetórias dos raios em uma fibra óptica de índice gradual é mostrada na Figura 12. Pode-se observar que a mudança do índice de refração definidas pelas Equações (3.6) e (3.7) faz com que o raio seja redirecionado para o eixo central da fibra. Esse redirecionamento dos raios de luz pode ser descrito pela variação contínua do índice de refração por meio de pequenas mudanças em degrau, conforme mostra a Figura 11.

Os raios luminosos se distanciam do eixo central da fibra quando viajam em um meio com o índice de refração maior para um meio com o índice de refração menor. Ao cruzar o eixo central os raios encontram sucessivas interfaces que possuem índices de refração menor. Em uma dessas interfaces ocorre a reflexão total, ou seja, o ângulo do raio de luz é maior que o ângulo crítico, fazendo assim, com que o raio volte ao eixo central. A partir desse ponto, o raio luminoso se propaga de um meio com índice de refração menor para um meio com índice de refração maior até cruzar o eixo central novamente. A partir daí, o processo se repete.

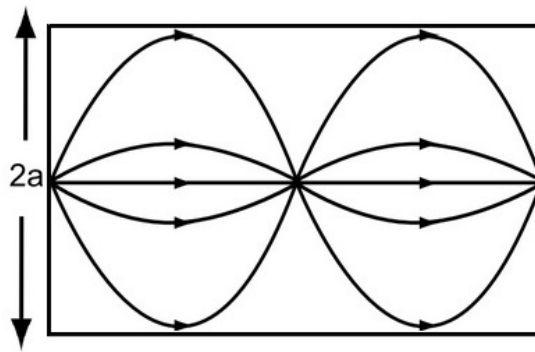


Figura 12 – Trajetórias dos raios em uma fibra de índice gradual  
 Fonte: Adaptado do Livro Projeto de Sistemas de Comunicações Ópticas

O ângulo de entrada, que permite o confinamento dos raios de luz no núcleo, diminui a medida que o ponto de entrada na fibra óptica se move para longe do eixo. Ou melhor, o ângulo de aceitação, e a abertura numérica, decrescem com o aumento da distância radial ao eixo da fibra óptica. Por essa razão, a eficiência de acoplamento é, geralmente, maior para as fibras de índice degrau que para as fibras de índice gradual.

Abertura numérica local é dada por:

- Se  $r \leq a$  :

$$AN(r) = AN(0) \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \quad (3.8)$$

- Se  $r > a$ :

$$AN(r) = 0 \quad (3.9)$$

onde  $AN(0) = n_1 \sqrt{2\Delta}$ , (AMAZONAS, 2005).

### 3.3 Modos de propagação

Os modos de propagação podem ser determinados por meio das equações de Maxwell sob algumas condições imposta pelo o tipo de guia de onda: geometria cilíndrica e o meio dielétrico. Esses modos, caracterizam o grupo de ondas eletromagnéticas que são guiadas de maneira estável pelo guia de onda. O guia de onda, aceita apenas um número discreto de modos de propagação. Os modos de propagação possuem uma frequência de corte equivalente a menor frequência a partir da qual é possível a propagação em um determinado modo. A ordem de um

modo está relacionada com o ângulo no qual o feixe correspondente a um modo faz com o eixo da fibra, ou seja, quanto mais acentuado for o ângulo, maior será a ordem.

De modo geral, os tipos de modos de propagação em guias de onda são:

- **Transversal Elétrico (TE):** o campo elétrico não possui componente na direção de propagação da onda.
- **Transversal Magnético (TM):** o campo magnético não possui componente na direção de propagação da onda.
- **Transversal Eletromagnético (TEM):** nem o campo elétrico, nem o campo magnético possuem componente na direção de propagação da onda.
- **Híbrido (HE):** tanto o campo elétrico como o campo magnético possuem componente na direção de propagação da onda.

A Figura 13 ilustra a representação vetorial dos três primeiros modos citados acima.

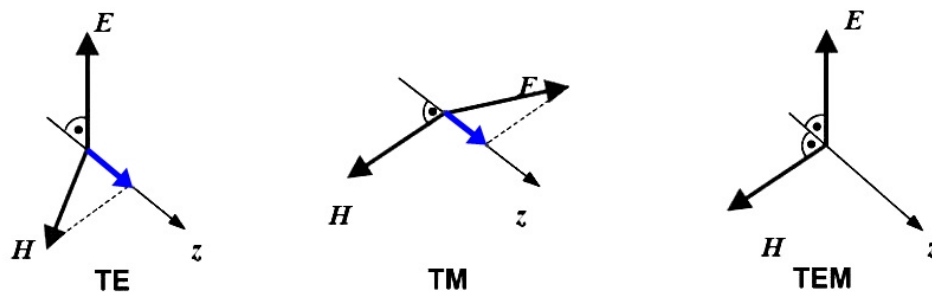


Figura 13 – Representação vetorial dos modos  
Fonte: Adaptado de [electricalibrary.com](http://electricalibrary.com)

Um indicador importante relacionado com a condição de corte referida acima, é o número  $V$  que é definido por:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} AN \quad (3.10)$$

Esse parâmetro é um número adimensional que define a quantidade de modos que a fibra suporta. Esse número  $V$  também é conhecido com frequência normalizada. Isso não se verifica para o modo de menor ordem HE<sub>11</sub>. Este modo não possui ponto de corte e deixa de existir somente quando o diâmetro do núcleo é igual a zero. Esse é o princípio no qual as fibras monomodo são baseadas. Cada modo pode existir unicamente para valores de  $V$  que excedam um determinado valor-limite, ou seja, cada modo possui um valor de  $V$  limite diferente. A condição limite é  $V \leq 2,405$ .

O número  $V$  pode ser usado para expor a quantidade de modos  $V_{ID}$  que uma fibra multimodo de perfil índice degrau pode possuir para um  $V$  grande. Para esse caso, uma estimativa usada para chegar até o número de modos suportados é:

$$V_{ID} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) = \frac{V^2}{2} \quad (3.11)$$

O número de modos propagação em uma fibra de índice gradual  $V_{IG}$ , para o caso  $\Delta \approx 1$  pode ser aproximado:

$$V_{IG} \approx \left( \frac{\alpha}{\alpha + 2} \right) \frac{V^2}{2} \quad (3.12)$$

onde  $\alpha$  é um parâmetro que descreve a variação do perfil do índice de refração.

### 3.4 Dispersão de sinais em fibras

A dispersão é responsável pelo alargamento dos sinais ópticos (campos eletromagnéticos) que são transmitidos pela fibra óptica. Caso os sinais percorram uma grande distância é possível que exista interferência inter-simbólica, ou seja, os sinais ópticos se sobrepondo.

A dispersão do sinal é resultado de fatores como o atraso intermodal também chamado de dispersão intermodal, dispersão intramodal, dispersão do modo de polarização e efeitos de dispersão de ordem superior. A seguir, está a descrição de cada um destes fatores.

#### 3.4.1 Dispersão Intermodal

Este tipo de dispersão é conhecido também como dispersão multipercurso e surge por causa do atraso modal, pois cada um dos modos possui um valor diferente de velocidade de grupo em uma determinada frequência. Esta dispersão surge apenas em fibras multimodo.

Dispersão de multipercurso pode ser entendida com o auxílio da Figura 9, na qual raios de luz podem viajar em percursos de diferentes comprimentos. Dessa forma, na saída da fibra, os raios estão defasados no tempo, mesmo que coincidam na entrada e viagem com a mesma velocidade por toda a fibra. Um pulso curto (chamado de impulso) se alargaria consideravelmente, por causa dos diferentes comprimentos de percursos.

Pode-se estimar o alargamento temporal dos pulsos considerando os raios que viajam por percursos de menor e de maior comprimento. O percurso mais curto ocorre para  $\theta_m = 0$ ,

sendo o comprimento igual ao da fibra  $L$ . O percurso mais longo ocorre para  $\theta_{in}$  dado pela Equação (2.47) e tem comprimento  $L/\sin(\theta_c)$ . Tomando a velocidade de propagação como  $v = c/n_1$ , o atraso temporal é dado por:

$$\Delta T = \frac{n_1}{c} \left( \frac{L}{\sin \theta_c} - L \right) = \frac{Ln_1}{cn_2} \Delta \quad (3.13)$$

onde  $\Delta$  é a diferença de índice de refração (AGRAWAL, 2014).

### 3.4.2 *Dispersão Intramodal*

Esta dispersão também conhecida como dispersão cromática, é o espalhamento de um pulso que ocorre em um único modo. O fenômeno também é conhecido como dispersão de velocidade de grupo, já que a dispersão é devida a velocidade de grupo ser em função do comprimento de onda. A dispersão cromática é o atraso diferencial que as várias componentes espectrais do sinal em propagação pela fibra óptica experimentam.

Essa dispersão é causada por:

1. **Dispersão material:** decorrente das variações de índices de refração que um pulso de luz experimenta em um guia de onda. Em outras palavras, a dispersão material resulta da variação do índice de refração do material constituinte da fibra óptica, de uma forma não linear com o comprimento de onda. Como a velocidade de grupo de um modo é função do índice de refração, as várias componentes espectrais de um dado modo(envelope) apresentam um atraso entre si, após a propagação ao longo da fibra, o que provoca o alargamento temporal do impulso. De forma mais didática, a Figura 14, ilustra o atraso sofrido pelas diferentes componentes espectrais para uma dispersão maior que zero.
2. **Dispersão de guia de onda:** causada pela geometria do guia de onda, ou seja, nem todo pulso de luz está totalmente confinado no núcleo, fazendo com que, a parte do pulso que viaja por um meio com índice de refração menor(casca), se propague com uma velocidade maior. Isso pode ser reduzido com o ajustamento do raio do núcleo e o contraste do índice de refração.

A definição do coeficiente de dispersão é dada por:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \eta_{eff}(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (3.14)$$

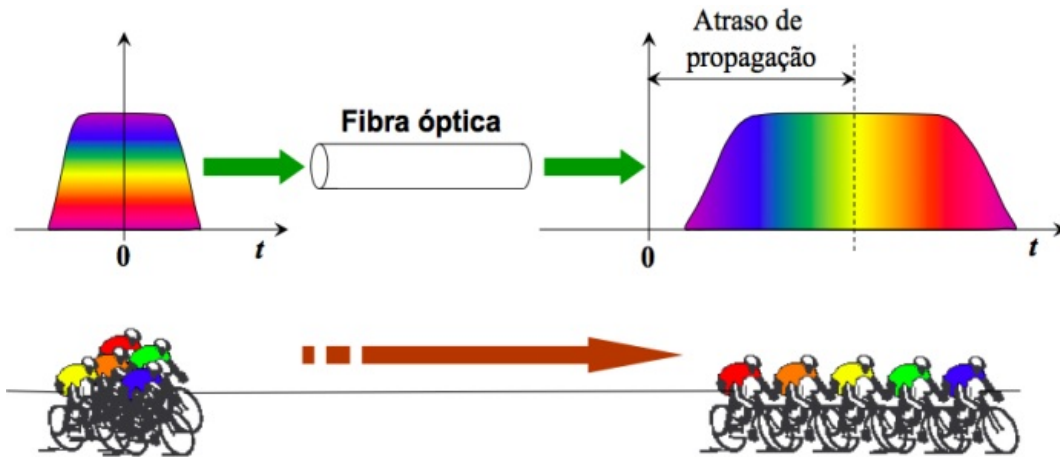


Figura 14 – Atraso temporal das diferentes componentes espectrais

Fonte: Análise da Propagação de Impulsos em Fibras Ópticas, (GONÇALVES, 2012)

onde  $\beta_2$  é a dispersão de velocidade de grupo,  $\eta_{eff}(\lambda) = \beta[\lambda, \eta_m(\lambda)]/k_0$  é o índice de refração efetivo,  $\beta$  é a contante de propagação,  $K_0 = 2\pi/\lambda$  é o número de onda no espaço livre e  $\eta_m(\lambda)$  é a dispersão cromática do material. A dispersão cromática pode ser expressa como sendo a soma da dispersão material  $D_m$  com a dispersão do guia de onda  $D_w$

$$D = D_m + D_w \quad (3.15)$$

onde  $D_m$  está relacionada com a variação do índice de refração linear com o comprimento de onda dado por:

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \eta_m(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (3.16)$$

A contribuição de  $D_w$  para a dispersão total dado pela Equação (3.15), depende dos parâmetros geométricos da fibra e dos índices de refração. No caso de uma fibra convencional, a dispersão de guia de onda  $D_w$  é dado por:

$$D_w = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \eta_w(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (3.17)$$

onde  $\eta_w$  é a distribuição geométrica do índice de refração que determina a relação de dispersão do modo guiado.

Outro fator importante que contribui para dispersão é o atraso de grupo, que pode ser entendido a partir da Equação não linear de Schrödinger que descreve a propagação de pulsos

eletromagnéticos:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (3.18)$$

onde  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são coeficientes de dispersão de primeira e segunda ordem;  $A$  é uma função que caracteriza o envelope do pulso;  $\alpha$  é o coeficiente de perdas;  $\gamma$  é o coeficiente de não-linearidade.

Na Equação (3.18) acima, a parcela que contém o termo  $\beta_1$ , representa a velocidade de propagação o pulso na fibra. Para encontrar  $\beta_1$  relacionado com tempo e distância, considere-se que o pulso viaje por um meio de comprimento  $L$ . Com o auxílio da relação linear que caracteriza a velocidade dos movimentos, pode-se calcular o tempo que o pulso levar para percorrer todo esse meio:

$$V_g = \frac{L}{T} \iff T = \frac{L}{V_g} \quad (3.19)$$

sendo  $V_g$  a velocidade de grupo e  $T$  o tempo. Analisando a relação  $v = \lambda f$ , conclui-se que cada componente de frequência se propaga com uma velocidade diferente, chamada de velocidade grupo. Com isso, irá ocorrer atraso em diferentes componentes de frequência. A unidade que representa a dispersão é  $s/m$  que o inverso da unidade física da velocidade. Essa unidade representa quantos segundos o pulso se espalhou ao progredir num determinado comprimento.

Como o referencial de tempo varia ao longo da propagação do pulso e a velocidade de grupo também varia, pode-se encontrar o  $\beta_1$  por meio da Equação (3.20):

$$\beta_1 = V_g^{-1} = \frac{T}{L} \quad (3.20)$$

Considerando que o referencial se move na mesma velocidade de propagação da velocidade de grupo, então o termo associado com  $\beta_1$  é desprezado. Dessa maneira, a Equação (3.14) é reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (3.21)$$

Com isso, a velocidade de grupo(velocidade do envelope) é desprezada (ARAÚJO, 2015).

### 3.4.3 Dispersão do modo de polarização

Uma potencial fonte de alargamento temporal de pulsos está relacionada com a birrefringência da fibra. A birrefringência é a divisão de um raio de luz refratado em dois feixes luminosos ortogonais. Pequenos desvios na simetria cilíndrica da fibra levam à birrefringência, devido aos diferentes índices de refração associados às componentes de polarizações ortogonais do modo fundamental da fibra. Além disso, fatores externos, como flexão, torção ou compressão da fibra, podem levar a birrefringência.

O estado de polarização é uma propriedade fundamental de um sinal óptico. A polarização é a orientação do campo elétrico de um sinal luminoso, que por sua vez, varia ao longo da fibra. Conforme mostra a Figura 15, a energia de um sinal em um comprimento de onda qualquer, ocupa dois modos de polarização ortogonais. A birrefringência variável ao longo do comprimento da fibra permite que cada modo de polarização viaje com velocidades diferentes.

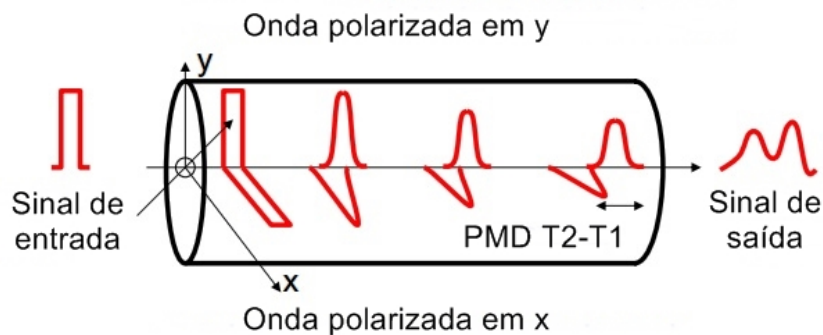


Figura 15 – Diferença de tempo de propagação entre os dois modos: *Differential Group Delay*  
Fonte: Adaptado (IFSC, 2014)

A diferença resulta nos tempos de propagação  $\Delta\tau_{PMD}$  entre os dois modos de polarização resultará em um alargamento de pulso. Este processo é a dispersão modal de polarização. Considerando que a velocidade de grupo dos dois modos de polarização ortogonais são  $V_{gx}$  e  $V_{gy}$ . Assim, o atraso diferencial entre os dois modos de polarização ao longo da propagação do pulso em uma fibra de comprimento  $L$  é:

$$\Delta\tau_{PMD} = \left| \frac{L}{V_{gx}} - \frac{L}{V_{gy}} \right| \quad (3.22)$$



### 3.5 Perdas em fibras ópticas

Diferentemente da dispersão que alarga um pulso de luz, a perda reduz a potência do sinal óptico que chega no receptor. A perda em um sinal luminoso é um fator importante a ser considerado em um projeto, pois o grau de atenuação desempenha um papel fundamental na determinação da distância entre o transmissor e o receptor ou amplificador. Os receptores ópticos exigem um certo valor mínimo de potência para que o sinal seja recuperado por completo. A atenuação do sinal, como também é chamada, pode ser gerada na própria fibra, nos conectores, nos acopladores e nas emendas.

A atenuação em uma fibra óptica é estabelecida por meio da relação entre as potências de entrada  $P_{in}$  e saída  $P_{out}$ . Assim, para uma fibra óptica de comprimento  $L$ , (AMAZONAS, 2005) define atenuação  $\alpha$  como:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (3.23)$$

sendo  $\alpha$  em dB/Km.

As fibras ópticas são, comumente feitas de plásticos e vidros. Os requisitos para o material incluem baixas perdas, e a possibilidade de ser transformado em fibras longas da espessura menor ou igual á de um fio de cabelo. O material também deve permitir pequenas variações no índice de refração, de tal forma que o núcleo e a casca da fibra possam ser construídos. Para uma fibra de índice gradual, uma variação contínua do índice de refração deve ser possível. As fibras de vidro, geralmente, têm menor atenuação que as fibras de plástico, e por isso são preferidas para comunicações de longa distância.

Os mecanismos básicos que geram atenuação nas fibras ópticas são:

1. Absorção
2. Curvaturas
3. Espalhamento
4. Projeto do guia de onda

#### 3.5.1 Atenuação por Absorção

A absorção é causada em três mecanismos distintos:

### *3.5.1.1 Absorção por defeitos atômicos na composição do vidro*

Estas imperfeições nas fibras são ausência de moléculas, agrupamento de alta densidade de grupos atômicos ou defeitos na estrutura química do vidro. As perdas resultantes desses defeitos são desprezíveis, porém podem ser significativas se a fibra for exposta à radiação ionizante, como pode ocorrer num ambiente em que haja um reator nuclear ou exames e terapia médicas que utilizam a radiação. A reação da fibra ao ser submetida a uma radiação ionizante é o aumento da atenuação devido a criação de defeitos atômicos que absorvem a energia óptica ao ser tocada por um pulso luminoso.

### *3.5.1.2 Absorção intrínseca pelos átomos-base constituintes do material da fibra*

Este tipo de absorção é uma propriedade natural do vidro. Essa absorção é forte na faixa de maiores frequências do espectro eletromagnético, ou seja, no ultravioleta conforme a Figura 5. A região do espectro que se encontra o ultravioleta é distante da região de operação da fibra óptica, fazendo assim que isso não seja importante na prática.

### *3.5.1.3 Absorção extrínseca por átomos de impureza no material*

As impurezas são as principais fontes de perdas em qualquer tipo de fibra óptica na prática. Impureza é estabelecida como uma substância indesejável que se introduz no vidro durante o processo de fabricação. É importante não confundir impureza com o Dopante que é utilizado para modificar o índice de refração na fibra. As impurezas metálicas como *Fe*, *Cu*, absorvem fortemente a energia luminosa na região de operação da fibra óptica (KEISER, 2014; AMAZONAS, 2005).

## **3.5.2 Atenuação por curvaturas**

As curvaturas que causam atenuações podem ser dividida em dois tipos:

### *3.5.2.1 Microcurvaturas*

Uma fonte de perdas em fibras ópticas, em particular na forma de cabos, está relacionada a distorções axiais aleatórias que ocorrem durante a instalação de cabos, quando a fibra é pressionada contra uma superfície que não é perfeitamente lisa. Tais perdas são referidas

como perdas por microcurvaturas. As microcurvaturas causam um aumento nas perdas de fibras, tanto monomodo como multimodo, e podem resultar em perda excessivamente grande se não forem tomadas precauções para minimizá-las. No caso de fibras monomodo, as perdas por microcurvaturas podem ser minimizadas com a escolha do parâmetro  $V$  o mais próximo possível ao valor de corte de 2,405, de forma que a energia do modo fique principalmente confinada no núcleo. Na prática, a fibra é projetada para ter  $V$  no intervalo de 2,0-2,4, no comprimento de onda de operação.

### 3.5.2.2 *Macrocurvaturas*

As curvaturas de caráter macroscópica, referem-se a aquelas de um grande raio, tais como as que acontecem intencionalmente ao enrolar a fibra óptica em um carretel ou quando ele deve contornar um determinado canto. Como a maioria das curvaturas macroscópicas o raio ultrapassa os 5 mm, assim, na prática, as perdas por macrocurvaturas são desprezíveis.

### 3.5.3 *Atenuação por espalhamento*

Perdas por espalhamento ocorrem quando uma parte da energia de um raio luminoso que está se propagando ao longo da fibra óptica, é convertida em modos ou em raios com comprimentos de ondas que não se propagam pela fibra. Esses fenômenos podem ser de espalhamento linear e não-linear (AMAZONAS, 2005).

Uma forma desse mecanismo é o Espalhamento Rayleigh que origina-se devido a flutuações microscópicas locais de densidade. As moléculas de sílica se movem de modo aleatório no estado fundido e no processo de fabricação da fibra. As flutuações de densidade levam a flutuações aleatórias do índice de refração em uma escala menor do que o comprimento de onda óptico  $\lambda$ . A seção reta de espalhamento varia com  $1/\lambda^4$ . Com isso, a perda nas fibras de sílica devido ao espalhamento Rayleigh pode ser escrita como:

$$\xi_R = \frac{C}{\lambda^4} \quad (3.24)$$

sendo que  $C$  está no intervalo 0,7 – 0,9 (dB/Km)- $\mu m^4$  dependendo dos constituintes do núcleo da fibra. Esses valores de  $C$  equivale  $\xi_R = 0,12 - 0,16$  dB/Km com comprimento de onda  $\lambda = 1550nm$ , indicando a perda por espalhamento Rayleigh nas proximidades desse comprimento de onda.

A reação de um dielétrico ao ser tocado por uma luz se torna não linear para campos eletromagnéticos intensos, e nas fibras ópticas não é diferente. Mesmo que a sílica não seja um material intrinsecamente não linear, a geometria de guia de onda que confina um raio de luz em uma pequena seção reta por longas distâncias de uma fibra, torna os efeitos não lineares importantes para projetos de modernos sistemas ópticos (AGRAWAL, 2014).

#### **3.5.4 Atenuação devido ao projeto do guia de onda**

As perdas em fibras ópticas podem ser afetadas pelas próprias características do guia de onda. No projeto de uma fibra óptica com baixas perdas, é fundamental garantir que a maior parte da potência luminosa seja confinada no núcleo da fibra, como também utilizar uma casca com uma espessura adequada e composta por um material com perdas comparáveis as do material do núcleo (AMAZONAS, 2005).

### **3.6 Acopladores ópticos**

O aumento contínuo da velocidade dos sistemas de telecomunicações tem despertado o interesse por dispositivos totalmente ópticos capazes de transmitir informações em altas velocidades. Assim, muitos dispositivos ópticos passivos e ativos, foram e continuam sendo desenvolvidos para este fim. Entre estes dispositivos, os acopladores desempenham um papel bastante importante em circuitos ópticos. Os acopladores de fibra, são dispositivos essenciais em sistemas ópticos, pois são utilizados em diversos outros dispositivos ópticos que necessitam da divisão do feixe óptico em outros dois feixes coerentes, por exemplo, mas fisicamente separados. (FERREIRA, 2008).

Os dispositivos passivos operam completamente no domínio óptico dividindo e combinando sinais luminosos. A divisão do fluxo de potência óptica é feita uniformemente para todos os comprimentos de onda, de modo que cada uma das  $N$  saídas recebe  $1/N$  da potência de entrada. Isso se dar por meio do acoplamento da potência passageira na região fundida, como mostra a Figura 16 (KEISER, 2014).

No caso de acopladores baseados em fibras, é necessária uma modificação na estrutura de acoplamento de maneira a aproximar os núcleos das fibras. Para esta finalidade, três métodos básicos têm sido desenvolvidos:

- Retirada de uma grande parte da camada de casca por meio de corrosão química.

- Remoção parcial da camada de casca em ambas as fibras por meio de um polimento mecânico controlado.
- Fusão de duas ou mais fibras após um leve entrelaçamento entre elas e um posterior aquecimento.

Para qualquer tipo de acoplador, é possível produzir diferentes taxas de acoplamento pela simples variação das condições de propagação em cada um dos guias.

### 3.6.1 Características dos acopladores

Os acopladores de fibra são comumente constituídos de duas fibras ópticas paralelas separadas por uma distância bem pequena, e são usados em diversas aplicações relacionadas a fibras ópticas. Como seus núcleos são bastante próximos, os modos fundamentais de propagação de cada núcleo sobrepõem-se parcialmente na região da casca entre os dois núcleos. Este acoplamento de onda evanescente provoca a transferência da potência óptica de um núcleo para o outro. Esta transferência de potência está diretamente relacionada com a potência crítica  $P_c$ , que é a potência necessária para se obter uma transferência de 50% entre os guias do acoplador.

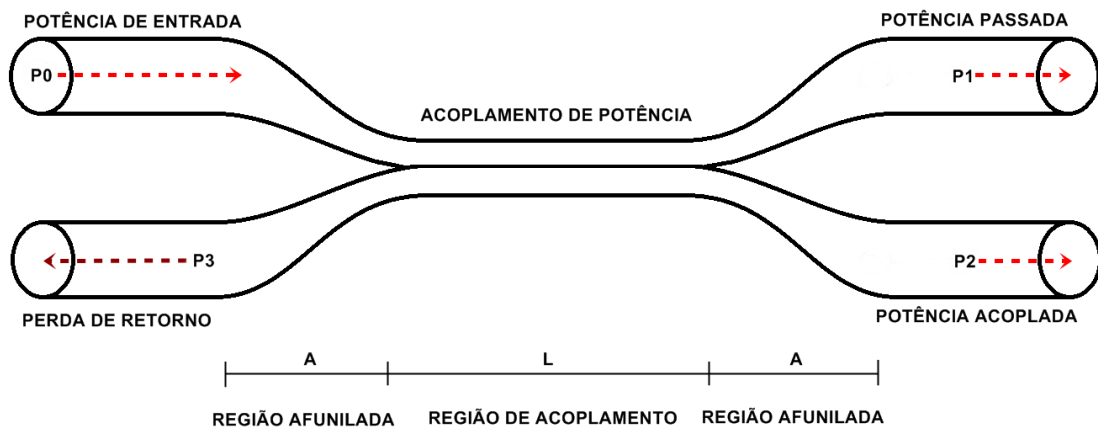


Figura 16 – Representação de um acoplador de fibra fundida  
Fonte: Próprio Autor

A potência crítica para um acoplador é dada pela Equação (3.25):

$$P_c = \frac{A_{eff}\lambda}{n_{NL}L} \quad (3.25)$$

sendo  $A_{eff}$  a área de seção transversal efetiva do guia de onda,  $\lambda$  o comprimento de onda no

vácuo,  $n_{NL}$  o índice de refração não linear e  $L$  o comprimento de acoplamento necessário para a transferência de um guia para outro. Para o acoplador da Figura 16, o comprimento  $L$  é definido como:

$$L = \frac{\pi}{2K} \quad (3.26)$$

onde  $K$  é o coeficiente de acoplamento linear entre os guias adjacentes. Ao analisar as Equações (3.25) e (3.26) pode-se perceber que a potência crítica é inversamente proporcional ao tamanho do acoplamento (FERREIRA, 2008).

O desempenho de um acoplador óptico é dado por meio razão de separação  $R_s$  que significa a porcentagem de divisão da potência óptica entre as portas de saída. Tendo como referência a Figura 16, tem-se que  $P_0$  é a potência de entrada e  $P_1$  e  $P_2$ , as potências de saída. Para simplificar a análise, considera-se que o dispositivo não possui perdas. Assim, a razão de separação ou coeficiente de acoplamento é:

$$R_s = \left( \frac{P_2}{P_1 + P_2} \right) \times 100\% \quad (3.27)$$

Ao se ajustar os parâmetros para que a potência seja dividida uniformemente, com metade da potência de entrada indo para cada saída, cria-se um acoplador de 3 dB.

Na prática, a consideração de que o dispositivo não possui perdas, não se aplica, pois em qualquer acoplador alguma luz é perdida quando o sinal atravessa. Os dois mecanismos básicos são a perda de excesso e perda de inserção. A perda de excesso  $P_{exc}$  em decibéis é dada por:

$$P_{exc} = 10 \log \left( \frac{P_0}{P_1 + P_2} \right) \quad (3.28)$$

A perda de inserção  $P_{ins}$  refere-se a perda que ocorre no percurso, ou seja, perda da porta de entrada  $P_{in}$  até a porta de saída  $P_{out}$ . Em decibéis  $P_{ins}$  é:

$$P_{ins} = 10 \log \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (3.29)$$

Outro parâmetro é a perda de retorno  $P_r$  que mede o grau de isolamento entre a entrada de uma porta e a potência óptica dispersa ou refletida de volta para a porta de entrada (KEISER, 2014).  $P_r$  é definida como:

$$P_r = 10 \log \left( \frac{P_3}{P_0} \right) \quad (3.30)$$

## 4 REDE ÓPTICA PASSIVA

Os capítulos anteriores proporcionaram um arcabouço matemático e físico da comunicação óptica. Neste capítulo o foco será na parte prática das comunicações ópticas, ou seja, na Seção 4.1 é apresentado as duas versões mais usuais em projetos de tráfego de dados por comunicação óptica. A Seção 4.2 introduz os principais componentes das redes de comunicações ópticas. A Seção 4.3 apresenta os indicadores mais comuns de um projeto PON e finalmente a Seção 4.4 detalha os principais equipamentos de medidas.

### 4.1 Rede EPON x GPON

As redes PON desempenham um papel importante na busca pela melhoria de conexão. São redes fáceis de instalar, têm maior alcance, escaláveis e possuem grande largura de banda. Por meio de uma única fibra, é possível transmitir dados, voz e vídeo. Por todos esses benefícios, essas soluções são ideais para qualquer negócio que precise de uma internet robusta para fortalecer seu crescimento.

Uma rede óptica passiva é fundamentada na utilização de comprimento de onda por meio do *Dense Wavelength Division Multiplexing*: Densa Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (DWDM) e com transmissão bidirecional através de uma única fibra óptica. Este tipo de sistema de comunicação óptica é caracterizado dessa forma devido a não utilização de componentes ativos entre a central de controle da rede e o cliente. Em vez disso, é usado apenas componentes passivos que são colocados no caminho de transmissão da rede com o intuito de orientar o fluxo de sinais ópticos.

A rede óptica passiva (PON) opera em conjunto com tecnologias padronizadas de acesso, onde protocolos específicos são capazes de controlar o acesso de múltiplos usuários. Este processo é feito por meio da divisão do tempo entre os clientes atendidos por uma mesma rede. Uma PON é uma rede que conecta o provedor ao local de destino com arquiteturas FTTx (Fiber to the x – Fibra até o x). O “x” pode ser FTTB (*Fiber to the building* – Fibra até o prédio) ou FTTH (*Fiber to the home* – Fibra até a casa), arquitetura que será usada no projeto, como ilustrado na Figura 17. As duas versões mais usuais são *Ethernet Passive Optical Network* (EPON) e GPON detalhadas na Tabela 1.



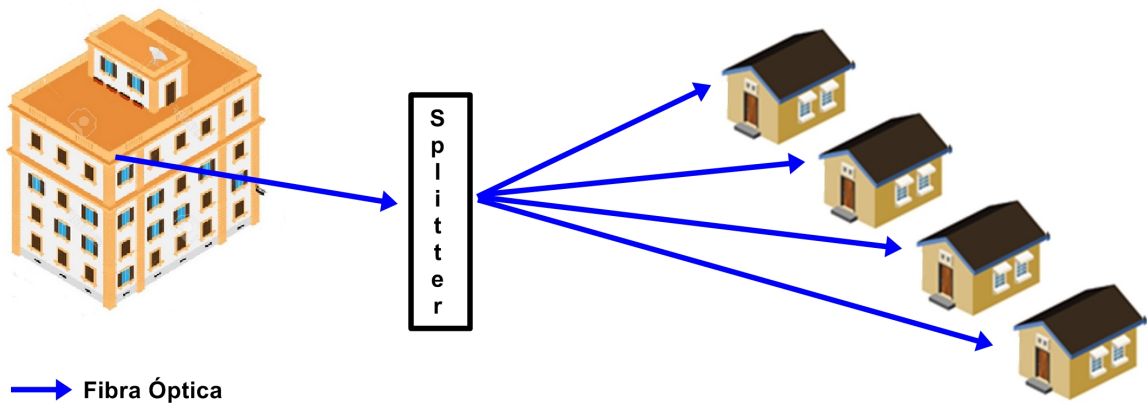


Figura 17 – Rede de distribuição óptica  
Fonte: Próprio Autor

Tabela 1 – Principais características das topologias de rede EPON e GPON.  
Fonte: Próprio autor.

CARACTERÍSTICAS	EPON	GPON
Padrão	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.1-6
Tipo de Fibra	Monomodo (ITU-T G.652)	Monomodo (ITU-T G.652)
Taxa de Transmissão (Gbps)	Downstream: 1,25 Upstream: 1,25	Downstream: 2,5 Upstream: 1,25
Comp. de onda p/ funcionamento	Downstream: 1490 nm Upstream: 1310 nm Vídeo: 1550 nm	Downstream: 1490 nm Upstream: 1310 nm Vídeo: 1550 nm
Número de fibras por ONU	1	1
Nº máx. de divisões por porta PON	64	64/128
Máximo alcance OLT-ONU	10 km (prev. 20 km)	20 km
Máxima inserção de perdas	15/20 dB	15/20/25 dB
Modo de tráfego entre OLT e ONU	Ethernet	ATM, Ethernet, TDM
Arquitetura de Transmissão	Ethernet (simétrica)	Simétrica, assimétrica

## 4.2 Principais componentes

A ideia fundamental de uma PON é a ausência de componentes que de precisam energia elétrica para o seu funcionamento entre o núcleo da rede e o elemento de acesso do cliente, em uma distância limitada de 20Km. O sinal óptico sai da Central Provedora de Serviço de Internet para a rede, e conseguinte é dividido pelo o *splitter* até que chegue ao destino final, onde se situam as unidades de redes ópticas(ONUs). Os principais elementos que constituem uma rede PON estão descritos a seguir.

#### 4.2.1 OLT

A *Optical Line Terminal*: Terminal de linha óptica (OLT) é um equipamento que tem a função de efetuar a conexão dos usuários com a central, transmitir dados, voz e vídeo no sentido operadora-usuário para todos os usuários conectados na rede, gerenciar a comunicação de dados, controlar a largura de banda alocada para cada usuário e caso seja necessário, controlar a alocação dinâmica de largura de banda. Além disso, é responsável por processar os sinais GPON, realizar a sincronia entre as ONUs e realizar as verificações de segurança (SILVA, 2012).

A OLT LD 2502F é uma plataforma compacta para rede óptica do tipo GPON, que distribui serviços de alta velocidade para usuários residenciais e corporativos. Esta, também promove interface elétrico/óptica com velocidade de até 10 Gbps a redes core Ethernet/IP, completando com as ONU's LightDrive, a solução de última milha óptica entregando a usuários finais serviços de até 1 Gbps. FURUKAWA



Figura 18 – Terminal de linha óptico (LD 2502F)

Fonte: <http://www.efurukawa.com/p/olt-lightdrive-gpon-ld2502f-8-pt-pon-6-pt-gb-eth-2-pt-10-gb-eth/35510288>

#### 4.2.2 DIO

O Distribuidor Interno Óptico (DIO) é o equipamento que recebe o cabo fibra proveniente da OLT. O cabo de fibra óptica é bem rígido, por sua vez, torna-se mais difícil trabalhar com o mesmo em algumas situações. Projetado para proteger o cabeamento da rede e facilitar sua instalação, o equipamento DIO acomoda o cabo óptico, organizando e armazenando de forma segura, tornando mais fácil o manuseio. Geralmente suporta até 72 fusões de fibra, dependendo do seu fabricante. As fibras chegam nele e são abrigadas em sua carcaça, onde é realizada uma emenda disponibilizando apenas conectores ópticos (OLIVEIRA, 2017).



Figura 19 – DIO BT 48 24F SM SC-APC

Fonte: <http://www.efurukawa.com/storefront/p/dio-bt-48-24f-sm-sc-apc-abnt/35260493>

### 4.2.3 ONU

A *Optical Network Unit*: Unidade de rede óptica (ONU) é um equipamento que é instalado nas dependências do usuário, realizando a interface óptica-elétrica para fornecer uma conexão efetiva à rede de dados. Chamada também de Terminal de Rede Óptica (ONT) tem como suas principais funções: processar os dados recebidos viabilizando a aplicação de algoritmos de priorização de *Quality of Service* (QoS), disponibilizar interfaces para serviços de comunicação de dados, telefonia, televisão rádio frequência, conforme a configuração fornecida pelo fabricante. Para que isso ocorra, ela deve ter a velocidade de comunicação de dados equivalente a velocidade do OLT, mas disponibilizando ao usuário apenas a fração de velocidade destinado a ele (SILVA, 2012).

A Figura 20, ilustra uma FK-ONT-G420W é uma ONT (Optical Network Terminal) compatível com padrão ITU-T G.984. O equipamento suporta taxas de até 1.25 Gbps para upstream e 2.5 Gbps para downstream.



Figura 20 – Unidade de rede óptica FK-ONT-G420W

Fonte: <http://www.efurukawa.com/storefront/p/modem-optico-gpon-fk-ont-g420w/35510195>

#### 4.2.4 Splitter

O divisor óptico comumente chamado de *splitter* realiza a divisão do sinal em um fator de  $2^n$ , onde  $n$  é o número de divisões. Este componente é fundamentado em acopladores de acordo com a Seção 3.5. O *splitter* é imprescindível numa rede PON, pois a divisão do sinal possibilita a construção de uma rede ponto-multiponto. Existem dois tipos de *splitter*, o balanceado e o não-balanceado, sendo utilizados para diferentes aplicações. Os balanceados realizam uma divisão de sinal igual para todas as fibras posteriores, ou seja, o sinal óptico é dividido em sinais posteriores iguais, sendo assim mais utilizado nas redes PON. Já os não-balanceados são utilizados em rotas que necessitam de uma divisão desigual entre as fibras (BARRETO, 2014).

A Figura 21, ilustra um *splitter*, onde recebe uma fibra divide o sinal em até 16 partes iguais, destinando-os para as fibras (OLIVEIRA, 2017). Porém, existe *splitters* que dependendo da sua capacidade, consegue dividir o sinal luminoso em até 64 partes iguais (EFURUKAWA.COM, ).



Figura 21 – Splitter

Fonte: <https://www.furukawatam.com/pt-br/catalogo-de-produtos-detalhes/splitter-optico-1xn-balanceado>

A estrutura física interna de um *splitter* de 1x32 é ilustrada na Figura 22.

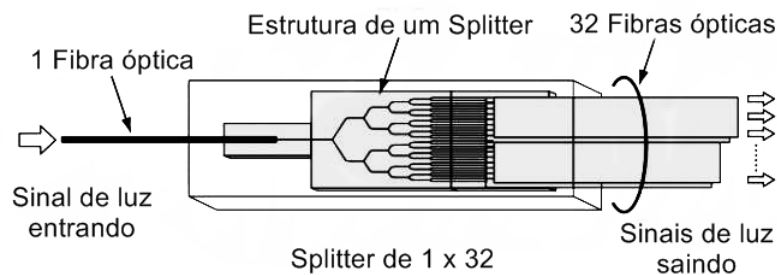


Figura 22 – Estrutura interna de um *Splitter*

Fonte: <https://medium.com/@chetankumar.nv/structure-of-plc-splitter-6f5b573e3444>

O *splitter* a ser utilizado no projeto da rede é de ordem de divisão de 1 para 8, aderindo uma perda de  $-10,5dB$  para cada *splitter* instalado.

#### 4.2.5 CEO

A Caixa de Emenda Óptica (CEO) é o equipamento responsável por acomodar dois ou mais cabos ópticos, que por sua vez, foram unidos por fusão. Este, abriga as emendas ópticas por fusão entre o cabo troncal e os de derivação da rede de distribuição óptica que foram feitas, impedindo o contato com o meio externo, resistindo a água e outros materiais proveniente do meio ambiente. A caixa de emenda óptica varia de acordo com seu tamanho, formato, adequando-se a necessidade de cada tecnologia utilizada (OLIVEIRA, 2017). A Figura 23 a seguir



Figura 23 – Caixa de Emenda Óptica

Fonte: Adaptado: <http://www.efurukawa.com/storefront/p/fk-ceo-4t-144f-24f-conjunto-de-emenda-optica-aereo/35520023>

#### 4.2.6 CTO

A Caixa de Terminação Óptica tem por finalidade distribuir o cabeamento óptico destinado aos clientes, ou seja, acomodar e proteger emendas ópticas por fusão entre o cabo de distribuição e os drops de uma rede óptica de terminação. Também proporciona a gestão e armazenamento dos adaptadores ópticos para saídas conectorizadas. Possui sistema de vedação mecânico.

A FK-CTO-16MC suporta duas configurações: até 2 bandejas de emenda com capacidade de até 16 fusões cada, e ainda uma bandeja de adaptadores com até 16 posições e armazenamento de até dois splitters; ou ainda 4 bandejas de emenda. Apresenta resistência a corrosão e envelhecimento, e proteção ultra-violeta, além de proteção adequada contra poeira e jatos d'água fortes. Pode ser instalada em fachadas de prédios, paredes ou postes, ou ainda em cordoalhas (EFURUKAWA.COM, ).



Figura 24 – Caixa de Terminação Óptica

Fonte: Adaptado: <http://www.efurukawa.com/storefront/p/fk-ceo-4t-144f-24f-conjunto-de-emenda-optica-aereo/35520023>

#### 4.2.7 Conectores

Ao trabalhar com vários cabos ópticos, por diversas vezes, é necessário a realização de uma junção entre eles, entretanto, nem todas as fibras são compatíveis devido a diferenças de diâmetro ou de características, conforme as normas da ITU. Os métodos de emenda podem ser divididos em dois tipos: fusão e conectorização. A fusão é um método de emenda no qual é utilizado um aparelho específico, conforme mostra a Figura 25, que realiza a junção entre as fibras de maneira correta, alinhando o núcleo das mesmas. Na prática, admite-se uma perda de  $-0,1$  dB por fusão.



Figura 25 – Equipamento para realizar fusão

Fonte: <http://www.shopwifi.com.br/produto/maquina-de-fusao-o-tech-hoea3000/>

Na conectorização é utilizado um dispositivo que faz esta junção de maneira mecânica (BARRETO, 2014). Os conectores a serem utilizados são os seguintes: conector SC/PC e conector SC/APC conforme a Figura 26. Em termos práticos, admite-se uma perda de  $-0,7\text{dB}$  por par de conectores.



Figura 26 – Conectores

Fonte: Adaptado de <http://www.efurukawa.com/storefront/search?Ntt=conector+sc+pc+apc>

Um conector óptico é constituído por um plug e pela estrutura de cabeamento, feita com uma tecnologia que usa pequenas fibras de vidro ou plástico. Ao destacar os termos PC (*Physical Contact*) e APC (*Angled Physical Contact*), refere-se ao tipo de polimento do conector.

O conector SC/PC possui uma área de contato que é polida em formatação convexa, possibilitando o contato entre as superfícies sem deixar espaços para uma interferência de partículas. Geralmente, a aplicação funciona para taxas de até  $1\text{Gbps}$ .

O polimento de um SC/APC é um diferencial mais recente, que trabalha com extremidades angulares. Dessa forma, este tipo de encaixe proporciona uma conexão mais firme, fazendo com que a transmissão de dados adote uma velocidade consideravelmente superior. Esse

benefício fez com que o conector APC se tornasse o mais utilizado em sistemas modernos de TV ou telefonia (ISP BLOG, 2016).

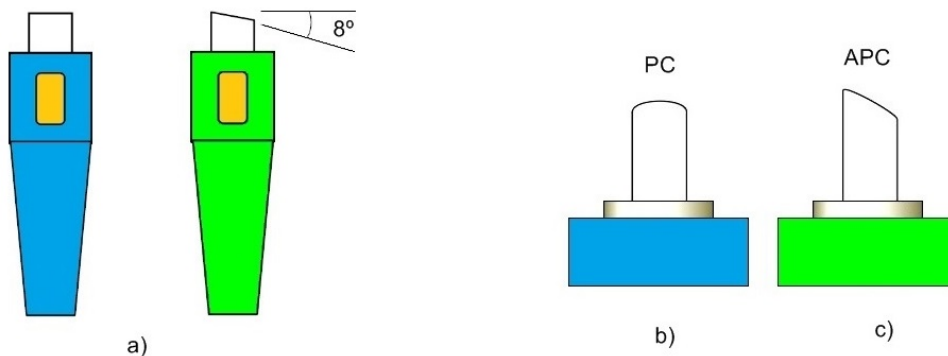


Figura 27 – a) Conector PC e APC b) Perfil do núcleo do tipo PC e c) Perfil do núcleo APC  
Fonte: Próprio autor

A Figura 28a, mostra com mais detalhe o polimento do conector do tipo PC sendo conectado com um do mesmo tipo. Da mesma forma, a Figura 28b, mostra um conector com polimento APC sendo conectado com um conector do tipo APC, fazendo com que, o sinal referente ao retorno óptico seja direcionado para a casca e se perca. Caso este sinal volte no mesmo sentido do sinal óptico, conforme a Figura 28a, o mesmo ocasionará uma interferência no sinal luminoso.

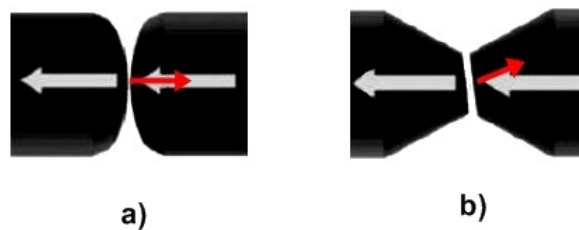


Figura 28 – a) Polimento do Conector PC e b) Polimento do Conector APC  
Fonte: Próprio autor

#### 4.2.8 Cabos de Fibras Ópticas

O elemento responsável pelo transporte e proteção do pulso luminoso que trafega na rede contra agentes externos é o cabo óptico. O cabo óptico possui as características físicas descritas a seguir.

- Núcleo da fibra, é composto de vidro resistente formado de sílica(SiO<sub>2</sub>) com alta pureza.



- Casca que reveste o núcleo, é a responsável pela propagação das ondas de luz evitando perdas nos trajetos.
- Revestimento interno, responsável pela proteção da fibra contra impactos externos que poderiam interferir no sinal que está sendo transmitido.
- Fibras de fortalecimento, serve para evitar a ruptura da fibra, pois existem situações de torções e de puxamentos do cabo no transporte e nas instalações.
- Proteção plástica, é a proteção mais externa que evita maiores desgastes do cabo por causa da exposição no meio ambiente (MADEIRA, 2011). A Figura 29 representa a forma básica da composição de um cabo de fibra óptica.

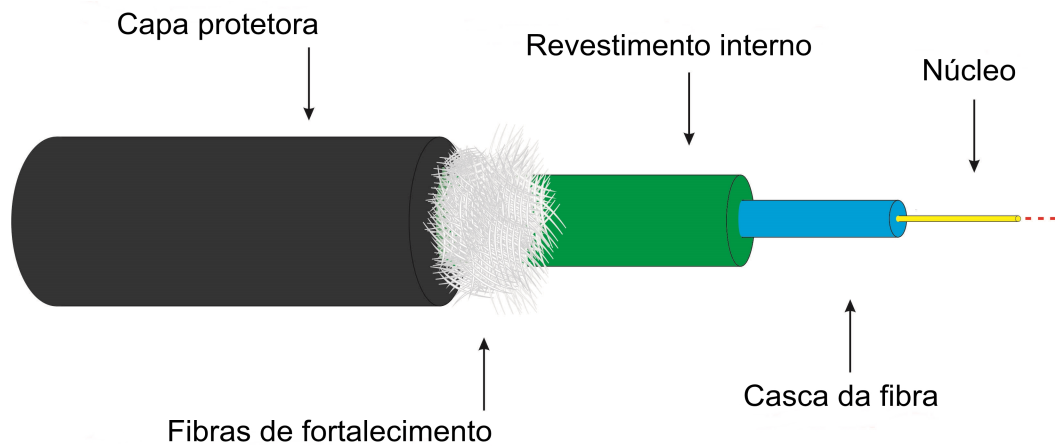


Figura 29 – Composição de um cabo de fibra óptica.

Fonte: Próprio Autor

Os cabos ópticos podem ser divididos em cinco categorias, sendo estas, definidas pelo tipo de ambiente e aplicação que o cabo será instalado. Para auxiliar a definir padrões de qualidades e requisitos mínimos, existem as normas chamadas de Normas Brasileiras (NBR) definidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O Brasil se diferencia em alguns aspectos das normas internacionais especialmente no quesito da padronização de cores de capa e fibra (TIA 598-C), porém a maioria dos requisitos mecânicos e ambientais são similares. A Figura 30 a seguir, ilustra alguns tipos de cabos com diferentes quantidades de filamentos ópticos.

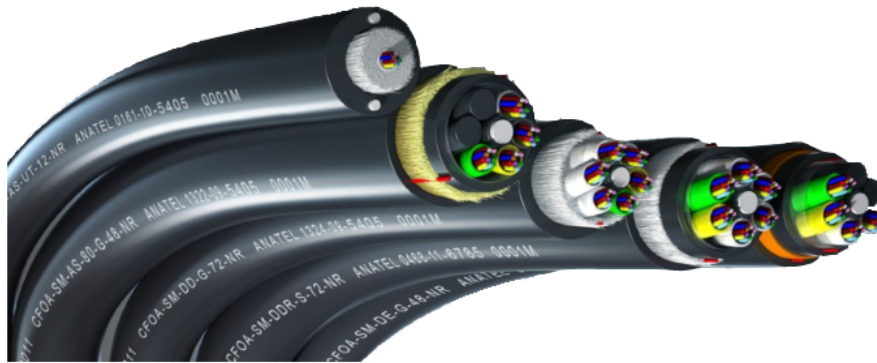


Figura 30 – Cabos Ópticos

Fonte: Adaptado de <https://under-linux.org/entry.php?b=4668>

### 1. Cabos Ópticos Externos

Este tipo de cabos são usados para planta externa, os quais realizam a travessia entre central provedora de internet passando pela caixa de emenda óptica (CEO) (percurso chamado de *backbone*), até uma caixa de terminação óptica (CTO) (rede de ramificação), estes tem a necessidade de serem mais robustos, resistentes a ação do sol e a intempéries por ficarem expostos em ambientes mais agressivos. Sendo estes construídos com cabos de maneira autossustentada regidos pela norma NBR 14160 para vãos até 200 metros ou NBR 15330 para longos vãos, por dutos ou espinado em torno de cordoalhas NBR 14566.

### 2. Cabos Ópticos Terminação

A segunda categoria são cabos de terminação que podem ser usados tanto em ambientes externos como internos. Utilizados a partir de uma caixa de terminação (CTO) até a casa do cliente. Eles possuem a mesma proteção que cabos externos, mas atendem aos mesmos requisitos de flamabilidade que os cabos internos. Estes requisitos de flamabilidade são necessários para evitar a propagação de incêndios dentro de um ambiente fechado e para controlar a emissão de fumaça e os elementos tóxicos presentes nesta fumaça. Estes cabos são usados em dutos ou espinados em cordoalha NBR 14772 e podem ter proteção anti-roedor NBR 15108 para proteção metálica e NBR 16164 para proteção dielétrica.

### 3. Cabos Ópticos de Acesso

Os cabos acesso realizam a transição entre uma caixa de terminação e a casa do cliente, eles são comumente chamados de *Drops* por serem autossustentado e realizarem a descida da caixa de terminação até o nível do solo. Utilizados para trechos *last-mile* NBR 15596, por percorrer somente a última milha, podendo ou não entrar na casa do cliente sem a

necessidade da troca de cabos por se tratar de um ambiente interno. Estes cabos podem ser usados em instalações do tipo autossustentados ou dentro de dutos e, como transitam por ambientes externos, também devem ter proteção contra a ação do sol e de intempéries NBR 15596.

#### 4. Cabos Ópticos Internos

Os cabos internos são utilizados somente dentro de ambientes fechados como uma casa ou edifício, pois seriam danificados se expostos a ambientes externos. Ainda que só possam ser usados em um tipo de ambiente, o mesmo tem subdivisões que podem ser separadas pela classe de flamabilidade. Estes cabos são tipicamente posto dentro de dutos e seguem uma norma específica para eles: NBR 14771.

#### 5. Cordões Ópticos

Os cordões ópticos também são utilizados em ambientes internos, apresentam uma maior facilidade de manuseio proveniente da sua flexibilidade e dimensões reduzidas, mas que apresentam resistência mecânica e densidade de fibras inferiores a um cabo. Estes cordões tem uma norma especifica para eles: NBR 14106.

A seguir, tem-se duas tabelas que se referenciam as nomenclaturas inscritas na parte exterior dos cabos ópticos que auxiliam na identificação dos mesmos. Os cabos ópticos externos, conforme o item 1 anterior, possui inscrito em seu corpo uma descrição de suas características, como mostra a Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Nomenclatura de caracterização de cabos ópticos externos.  
Fonte: Próprio autor.

<b>Nomenclatura de caracterização</b>	<b>Significado</b>
CFOA	Cabo de Fibra Óptica de Acrílico, revestido com acrilato.
SM	( Single Mode): Tipo monomodo.
AS	Auto Sustentado.
80	O cabo suporta tração exercida em vãos de até 80 metros.
12F	Número de filamentos de fibra que o cabo possui.
NR	Cabo é não retardante à chama; queima facilmente.

Os cabos ópticos de acesso, conforme o item 3 anterior, possui inscrito em seu corpo uma descrição de suas características, como mostra a Tabela 3 a seguir:

A perda associada à fibra óptica é característica própria de cada fibra, pois isso é determinado pelo fabricante. Porém, na realidade admite-se uma perda de  $-0.35\text{dB/Km}$  para a fibra que irá ser utilizada no projeto.

Tabela 3 – Nomenclatura de caracterização de cabos ópticos de acesso.  
Fonte: Próprio autor.

Nomenclatura de caracterização	Significado
CFOAC	Cabo de Fibra Óptica Auto-Sustentando Compacto.
BLI-A/B ou SM	Tipo monomodo com baixa sensibilidade à curvatura.
CD ou CM	Formato do cabo: Compacto Dielétrico ou Metálico.
06	Número de filamentos de fibra que o cabo possui.
AR ou CO	Atrito Reduzido ou Convencional.
LSZH	Retardante à chama com baixa emissão de fumaça tóxica.

### 4.3 Principais indicadores para um projeto de rede óptica passiva

Os principais fatores a serem observados para a construção de uma PON são: previsão de demanda, definição de serviços, *take rate*, extensão da rede, cenários, ambiente do cliente, escalabilidade e os aspectos de instalação, manutenção e o operação.

- **A previsão da demanda** em um determinado cenário, auxilia na definição da configuração de rede a ser empregada no projeto.
- **Definição dos serviços.** Os serviços que podem ser ofertados aos usuários são: dados, voz e vídeo. Com isso, a escolha destes, interfere na topologia de rede a ser usada.
- **Take Rate** é a relação de  $HC/HP$ , sendo *HC Home Connected* o número de usuários que pretende atender em um período de 3 a 4 anos. *HP Home Passed* é o número de usuários no final da vida útil da rede, período acima de 15 anos. Os equipamentos, *splitters*, caixas de atendimento, cabos *drops*, e demais materiais para conectar o usuário na rede, devem ser dimensionados para atender a quantidade de HCs. Os cabos ópticos externos, os de terminações, caixas de derivações, armários ópticos, devem ser dimensionados para quantidade de HPs.
- **Orçamento de potência óptica** é a contabilização ou estimação da atenuação óptica máxima que deve atender as exigências de potência acessível no transmissor e da sensibilidade do receptor. Os valores de perdas dos componentes são informados pelos fabricantes. Tecnicamente admiti-se a perda por fusão equivalente a 0,1dB.
- **Escalabilidade** é o parâmetro a qual a rege o processo de crescimento ao longo do tempo da rede de acesso, assim como os equipamentos, nela instalados. Além dos dados de mercado, demanda e serviços, as soluções tecnológicas utilizadas numa rede, devem proporcionar a evolução da rede sem grandes alterações na mesma.

### 4.3.1 Atenuação total

A atenuação da potência óptica em um guia de onda é resultado dos processos de absorção, mecanismos de dispersão e dos efeitos de guia de onda, de acordo com o exposto no Capítulo 2. O engenheiro responsável por projetos que se utiliza fibra óptica está interessado na perda de transmissão total da fibra. Dois métodos básicos para a medição (determinação) do efeito da atenuação estão descritos a seguir.

#### 4.3.1.1 Técnica de corte

Este método necessita acessar as ambas extremidades da fibra para serem realizadas as medições. Essas medições podem ser feitas em um ou vários comprimentos de onda. Para obter a perda média de transmissão, o primeiro passo é medir a potência óptica de saída e posteriormente, a potência óptica próxima da fonte. Para realizar essa última medição, a fibra deve ser cortada a poucos metros da fonte para não prejudicar a condição de entrada. Com isso, pode-se utilizar a Equação (3.23) para tal aferição, sendo  $P_{in}$  a potência óptica na extremidade cortada mais próxima da fonte e  $P_{out}$  a potência óptica na extremidade de saída mais distante da fonte e  $L$  é a distância entre as referidas extremidades.

O coeficiente  $\alpha$  a qual representa tal medição é dado em dB/Km. O motivo para seguir esses passos é dado pela extrema dificuldade de se calcular a quantidade exata da potência óptica lançada na fibra. Ao se utilizar o método de corte, a potência óptica que sai do menor comprimento da fibra é a mesma que entra na fibra de comprimento  $L$ .

#### 4.3.1.2 Método de perda de inserção

Para cabos com conectores, não se pode utilizar o método de corte. Nesse caso, é comum utilizar uma técnica de perda de inserção. Esta técnica é menos precisa do que o outro método, porém destina-se a medições de campo para fornecer a atenuação total de um conjunto de cabos em decibéis.

Para realizar o respectivo procedimento, o conector de fibra de lançamento de pequeno comprimento deve estar ligado ao conector do sistema de recepção, e assim, o nível de potência lançada  $P_1(\lambda)$  é registrada. Logo após, o conjunto de cabos a ser testado é ligado entre os sistemas de lançamento e recepção, e o nível de potência recebida  $P_2(\lambda)$ , é registrado. Com

isso, utiliza-se a seguinte Equação (4.1) para calcular a atenuação do cabo em decibéis.

$$A = 10 \log \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \quad (4.1)$$

Essa medida de atenuação é a soma das perdas da fibra cabeada e de conexão entre o conector de lançamento e o cabo a (KEISER, 2014).

#### 4.4 Equipamentos de Medidas

Conhecer previamente os equipamentos usados nas medições de desempenho nas redes de fibra ópticas é muito importante, pois estes, irão fornecer parâmetros os quais o profissional utilizará para a verificação da viabilidade e saber se os critérios de projeto estão sendo atendidos.

##### 4.4.1 *Reflectômetro óptico de domínio do tempo*

O *Optical Time-Domain Reflectometer*, Reflectômetro Óptico de Domínio do Tempo (OTDR), é um instrumento versátil e portátil amplamente utilizado para avaliar as propriedades de um *link* já instalado de fibra óptica. Além da identificação e localização de possíveis defeitos ou anormalidades dentro de um *link*, esse equipamento de medida, determina parâmetros como atenuação da fibra, comprimento, perdas nos conectores e nas emendas ópticas e os níveis de refletância de luz.

Um OTDR opera lançando periodicamente pulsos estreitos de laser em uma extremidade da fibra em teste utilizando tanto um acoplador direcional, como um circulador, conforme a Figura 31, (KEISER, 2014). Um circulador óptico é um componente de fibra que possui três portas ópticas. Um sinal óptico injetado na porta 1 sai na porta 2 e um sinal óptico que entra pela porta 2 sai na porta 3. Os circuladores são usados em transmissão bidirecional em fibra e serve para injetar ou extrair sinais sendo transmitidos e possuem uma baixa perda de inserção e alta isolamento entre as portas. Estes componentes operam em comprimentos de onda bem definidos e com uma banda da ordem de 20 a 30 nm (OPTOLINK.COM.BR, ).

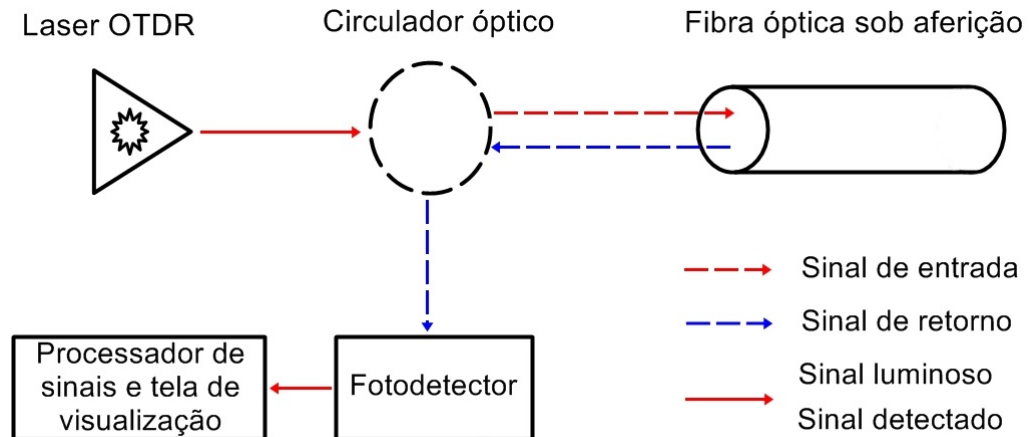


Figura 31 – Princípio de funcionamento de um OTDR usando um circulator óptico  
Fonte: Próprio Autor

As propriedades do *link* de fibra são definidas por meio da análise da amplitude e das características temporais da forma de onda da luz e receptor, módulos de aquisição e processamento de dados, uma unidade de armazenamento de informações para a retenção de dados na memória interna ou em disco externo e um monitor. A Figura 32 a seguir, mostra um OTDR portátil para as medições em campo.



Figura 32 – OTDR portátil  
Fonte: <https://www.indiamart.com/proddetail/yokogawa-aq7275-otdr-12834379373.html>

#### 4.4.1.1 Localizar falha na fibra óptica

Para encontrar rompimentos e imperfeições em uma fibra óptica de comprimento  $L$ , basta calcular a diferença de tempo entre os pulsos refletidos a partir da frente da fibra e da localização onde ocorreu o evento. Se essa diferença de tempo é  $t$ , então o comprimento  $L$  é

dado por:

$$L = \frac{ct}{2n_1} \quad (4.2)$$

onde  $n_1$  é o índice de refração do núcleo da fibra. O número "2" no denominador da Equação (4.2) representa o fato de que a luz viaja da origem ao ponto de ruptura  $L$  e depois volta viajando a mesma distância  $L$ .

#### 4.4.1.2 Mensurar perda de retorno

Ao usar como fonte de luz o *laser*, as reflexões da luz no sentido oposto acontecem em vários pontos do *link* óptico. Essas reflexões podem surgir em conectores, extremidades da fibras, interface do divisor óptico e no interior da fibra por espalhamento Rayleigh. A porcentagem de energia refletida de volta a partir de um determinado ponto de um caminho de luz é chamada de retroflexão. Se não forem controladas, as retrorreflexões poderão causar ressonância óptica na fonte ocasionando um mal funcionamento e aumento de ruído no *laser*. Além do mais, as retrorreflexões podem ser submetidas as múltiplas reflexões na linha de transmissão, fazendo com que aumente a taxa de erro de *bit* ao entrar no receptor.

Em vista disso, deve-se medir a perda de retorno óptico (ORL) que é definida como a potência reversa total em relação ao total de potência frontal em um ponto particular. A ORL é dada por:

$$ORL = 10 \log \left( \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \right) \quad (4.3)$$

sendo  $P_{ref}$  a potência refletida e  $P_{inc}$  a potência incidente. Pode-se usar um OTDR para mensurar esse parâmetro (KEISER, 2014).

#### 4.4.2 Power Meter

O *Power Meter* é destinado para verificar níveis de potência nos comprimentos de onda utilizados na rede GPON, conforme a Tabela 1. Este equipamento possui *thresholds*, limiares configurados para facilmente validar se os níveis de potência estão dentro dos padrões. Os testes de medição de potência consistem em verificar a potência recebida e transmitida pelas



OLTs e pelas ONUs com o objetivo de averiguar se os valores obtidos estão contidos no intervalo de sensibilidade de potência especificado por cada tecnologia.

Para realizar essas aferições é utilizado um *Power Meter* colocado em série no sistema. Um gerador de tráfego *Ethernet* é utilizado para inserir um tráfego nas OLTs e ONUs de forma a excitar o transmissor dos equipamentos e possibilitar a medição da potência óptica de entrada de cada componente (CARDOSO, 2015). A Figura 33, ilustra este equipamento.



Figura 33 – Power Meter

Fonte: <http://www.clubeisp.com.br/produto/medidor-de-energia-com-vfl-power-meter/>

## **5 PROJETO DE UMA REDE ÓPTICA DE AMPLITUDE MUNICIPAL**

Este capítulo é destinado ao estudo e projeto de uma rede GPON - FTTH (*Gigabit Passive Optical Network - Fiber to the home*) de acordo com as normas nacionais e as viabilidades para que possa atender a demanda dos usuários. Na Seção 5.1 e 5.2 são apresentadas as premissas para o projeto e seus dimensionamento. A Seção 5.3 exhibe os procedimentos práticos FTTH e a Seção 5.4 mostra o plano de fusão.

### **5.1 Premissas para o projeto da rede**

Para iniciar um projeto de uma rede FTTH, precisa-se ter o conhecimento sobre algumas relações importantes e sobre os procedimentos práticos, já que são cruciais na elaboração do mesmo. As referidas relações, estão descritas a seguir de forma sequencial igualmente ao realizar-se o procedimento prático.

#### **5.1.1 Área de Atendimento**

O projeto é proposto para atender usuários de dados na cidade de Moraújo no norte do Ceará. Segundo o (IBGE, 2010), Moraújo em 2010 possuía 8070 habitantes divididos entre sede e localidades. Neste mesmo ano, a sede deste município, possuía um total de 941 residências. A estimativa para 2018, é que Moraújo possua 8689 habitantes, ou seja, um crescimento de 7,5% em relação ao ano de 2010. Realizando a mesma proporção de crescimento populacional com o número de residências, Moraújo deve possuir 1017 residências em 2018.

Considerando a taxa de penetração (porcentagem de clientes que poderão aderir a rede) seja de 40%, com isso, o projeto inicialmente visa atender pouco mais de 400 usuários. Por meio dessa informação, pode-se estabelecer o tamanho das células, conforme a subseção 5.1.2. A Figura 34, ilustra a imagem de satélite da localização.



Figura 34 – Localização do projeto FTTH  
Fonte: Google Earth

### 5.1.2 Tamanho das Células

Uma célula é uma área de atendimento com vários usuários, ou seja, varias residências, que é definida pela relação entre a ordem de divisão do *splitter* e a taxa de penetração. A ordem de divisão considerada é de 1 : 8 (ler-se: um para oito), ou seja, o sinal óptico chega de uma fibra e é dividido em oito sinais ópticos para outras oito fibras possíveis. O tamanho da célula  $TC$  é caracterizado por:

$$TC = \frac{\text{Ordem de divisao do splitter} \times 100\%}{\text{Taxa de Penetracao} (\%)} \quad (5.1)$$

### 5.1.3 Número de CTO's

Cada célula possui uma caixa de terminação óptica, conhecida também como caixa de atendimento. De forma mais precisa, para se obter o número de CTO's, precisa-se saber a quantidade de células que foram estabelecidas na cidade.

Outra maneira de definir a quantidade de CTO's é relacionando o número de residências com o tamanho da célula, já encontrado. O número de caixas de atendimento é:

$$N^{\circ} \text{ de CTO's} = \frac{N^{\circ} \text{ de Residencias}}{\text{Tamanho da celula}} \quad (5.2)$$

### 5.1.4 Número de Ramais ou CEO's

A quantidade de caixas de emendas ópticas, CEO's, é igual ao número de ramais que uma determinada rede possui. Este valor pode ser definido por meio da relação entre o número de CTO's e a ordem de divisão do *splitter*, conforme a Equação (5.3):

$$N^{\circ} \text{ de Ramais} = \frac{N^{\circ} \text{ de CTO's}}{\text{Ordem de Divisao}} \quad (5.3)$$

## 5.2 Quantitativo das relações

As relações definidas na seção 5.2 ao serem aplicadas no projeto com os referentes dados da subseção 5.2.1, encontra-se o quantitativo que será executado na prática. A Tabela 4, possui os devidos valores.

Tabela 4 – Quantitativo das relações.

Fonte: Próprio autor.

<b>RELAÇÕES</b>	<b>VALORES</b>
Número de Residências	1017
Número de Possíveis Clientes	407
Tamanho da Célula	20
Número de CTO's	51
Número de CEO's	7

## 5.3 Procedimentos práticos FTTH

Os procedimentos práticos para a elaboração de uma rede óptica do tipo FTTH, possui uma sequência seis de passos importantes a ser feitos utilizando a ferramenta Google Earth.

### 5.3.1 Coleta dos Postes

A coleta dos postes é o recolhimento da localização geográfica e as características de cada poste. As localizações podem ser colhidas por meio de um GPS (*Global Positioning System*) ou no Google Earth. A Figura 35 mostra a coleta dos postes.

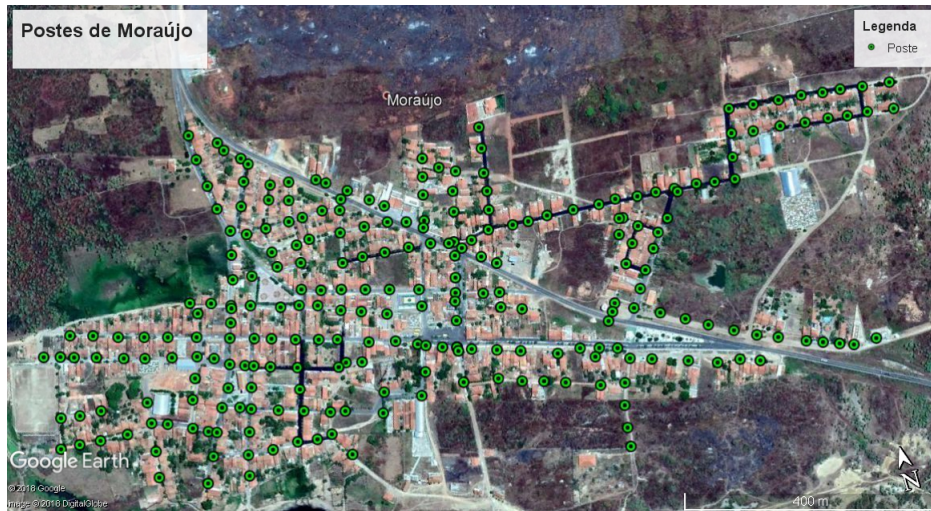


Figura 35 – Coletas dos postes para o projeto FTTH  
Fonte: Google Earth

### 5.3.2 Definindo as Células

A definição de célula foi feita na subsecção 5.2.2. A parti disso, foi realizado o procedimento de criação das células, sendo estas de tamanho 20, distribuídas por toda a cidade. O mapeamento de todas as células é mostrado na Figura 36.



Figura 36 – Células do projeto FTTH  
Fonte: Google Earth

### 5.3.3 Localização das CTO's

As caixas de atendimentos devem ser distribuídas nas localizações das células. É ideal que a localização das caixas de atendimento estejam mais próximas de uma maior



quantidade de residências, ou seja, perto de um maior volume de possíveis clientes, pois minimiza o gasto de cabo *Drop* ao ser utilizado para atender um cliente. A Figura 37 mostra a distribuição das CTO's representada por círculos em vermelho.

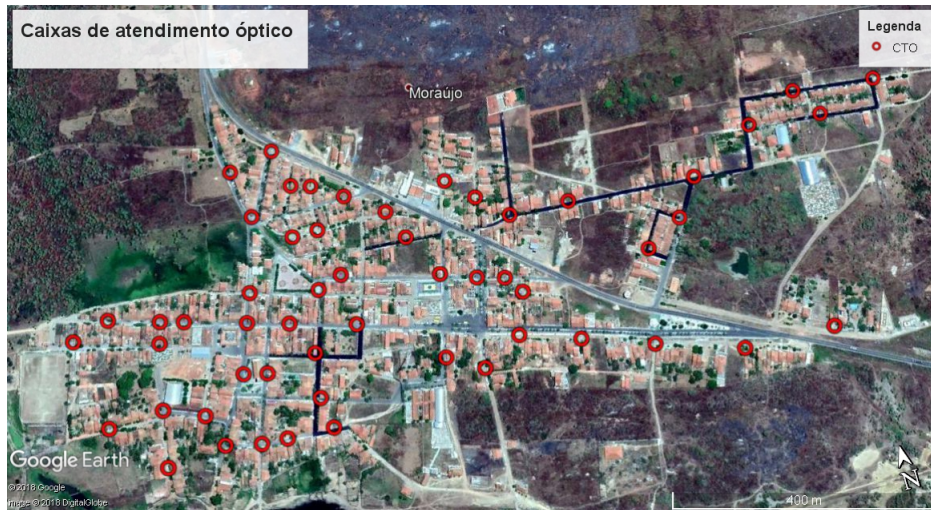


Figura 37 – Localização das CTO's do projeto FTTH  
Fonte: Google Earth

#### 5.3.4 Localização das CEO's

Uma caixa de emenda óptica deve ser localizada num determinado local que facilite ativar 8 CTO's, já que a ordem de divisão definida anteriormente foi de um para oito. Assim, cada CEO definirá um ramal com suas respectivas 8 CTO's. A Figura 38 mostra a localização das caixas de emendas representadas por triângulos.



Figura 38 – Localização das CEO's do projeto FTTH  
Fonte: Google Earth

### 5.3.5 Demarcação do Backbone

O *Backbone* conhecido também como rede de alimentação, é em outras palavras, a espinha dorsal da rede, ou seja, o *backbone* é o trecho que interliga todos as caixas de emendas a central de atendimento situada na OLT. Com essa característica pode-se concluir que este elemento é um dos principais da rede, pois caso ocorra uma possível ruptura neste, ocasionará uma queda do sinal em todos os elementos posteriores a essa ruptura. A Figura 39 ilustra o *backbone* já demarcado em azul.



Figura 39 – Demarcação do *Backbone* do projeto FTTH  
Fonte: Google Earth

### 5.3.6 Rede de Distribuição

A rede de distribuição também é conhecida como rede de ramificação e tem a função de levar o sinal da caixa de distribuição até a caixa de atendimento. Nesta parte da rede são encontradas as caixas de emendas responsáveis pela expansão do cabo óptico, dentro dela são feitas fusões a partir de dois cabos ópticos. Também são encontrados *splitters*, com a função de dividir a fibra em vários filamentos ópticos. A Figura 40 mostra a rede de distribuição projetada para a cidade de Moraújo. Os ícones circulares representam as caixas de atendimento distribuídas por toda a cidade, resultando em 56 delas. Este resultado é diferente do calculado na Tabela 5.2, visto que, aquele resultado foi feito por meio de uma estimativa da quantidade de residências definida na Seção 5.1.1. Utilizando a relação (5.2), pode-se concluir que o número de residências é cerca de 1120. As linhas traçadas representam os cabos ópticos.



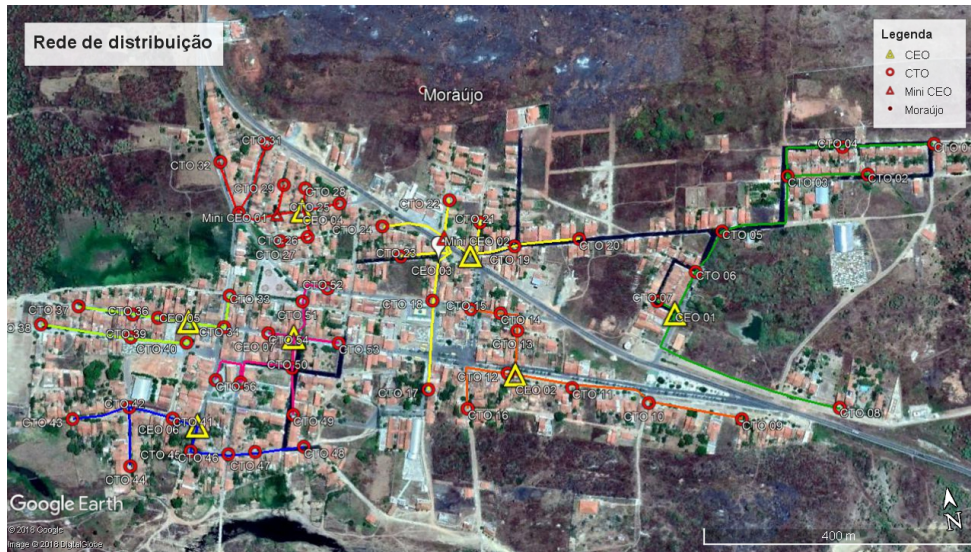


Figura 40 – Demarcação da rede de distribuição do projeto FTTH  
Fonte: Google Earth

### 5.3.7 Rede de Atendimento

Neste último ponto, a rede de atendimento faz a última milha de interligação do cliente com a caixa de atendimento. Aqui são instaladas as caixas de terminação, que por sua vez fornecerá ao cliente o acesso a rede. As CTO's dependendo de seu modelo podem ou não utilizar de fusão. Os conectores também são peça chave para conclusão da interligação com o cliente.

## 5.4 Elaboração do Plano de Fusão

O plano de fusão é o planejamento de como será executado na prática as emendas ópticas, isto é, as fusões que serão feitas para ativação de todos os elementos da rede. Os cabos de fibras ópticas, possuem padrões na organização interna das fibras, separando-as por cores e números. A Figura 41 mostra dois padrões de cores. O primeiro é definido pela ABNT utilizado no Brasil, padrão também usado no plano de fusão em Anexo A. O Anexo B, possui os sete diagramas dos ramais projetados, e isto, será utilizado como guia para a implantação da rede.

Cabos que possuem fibras organizadas conforme o padrão da ABNT é ilustrada por meio da Figura 42, sendo o cabo 1 de 6 fibras ópticas e o cabo 2, com 12 fibras.



Fibra	Cor – Padrão ABNT
1	Verde
2	Amarelo
3	Branco
4	Azul
5	Vermelho
6	Violeta
7	Marrom
8	Rosa
9	Preto
10	Cinza
11	Laranja
12	Aqua

Figura 41 – Padrão de cores utilizadas para organização das fibras ópticas.  
Fonte: Adaptada <https://under-linux.org/entry.php?b=4668>

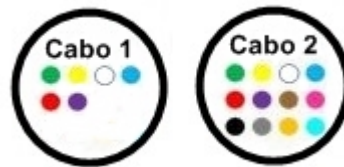


Figura 42 – Organização dos cabos de seis e doze Fibras Ópticas.  
Fonte: Próprio autor.

## 5.5 Materiais utilizados

Os materiais utilizados na infraestrutura da rede óptica estão descritos e quantizados a seguir. Vale salientar, que no ato de projetar a rede, foram contabilizados 15% de cabos ópticos a mais do que a medida real. Outro aspecto importante é em relação as fibras de reserva. Foram estabelecidos cabos ópticos que fornecessem uma fibra reserva para cada caixa de atendimento óptico, como também, cabos que fornecessem uma fibra de reserva para cada caixa de emenda óptica. A contabilização destes cabos esta contida na Tabela 43.

Resumo das quantidades de cabos ópticos			15% a mais	
2fo	1600	metros	1840	metros
4fo	1330	metros	1529,5	metros
6fo	2140	metros	2461	metros
8fo	1640	metros	1886	metros
12fo	370	metros	425,5	metros
24fo	0	metros	0	metros
36fo	0	metros	0	metros
48fo	0	metros	0	metros
<b>Total</b>	<b>7080</b>	<b>metros</b>	<b>8142</b>	<b>metros</b>

Figura 43 – Contabilização da quantidade em metros de cada tipo de cabo óptico.  
Fonte: Próprio autor.

A cidade de Moraújo está totalmente conectada via fibra óptica. Qualquer residência que esteja dentro da zona urbana daquele município poderá ser atendida com total estabilidade de conexão. A execução do projeto implicou os seguintes resultados:

- A coleta de postes computou 243 postes, porém irá ser utilizados 151.
- A distribuição das CTO's resultou em 56 caixas de atendimento.
- A distribuição das CEO's resultou em 7 caixas de emendas.
- *Splitters* conectorizados é igual a quantidade de caixas de atendimentos, 56.
- *Splitters* não conectorizados é igual a quantidade de caixas de emendas, 7.
- 27000 metros de Cabo *DROP* compacto com mensageiro metálico com UMA fibra óptica;
- 2 Mini-CEO.
- 7 Cordões ópticos.
- 1 DIO de 16 fibras.
- 1 OLT GPON com 8 portas PON.

O provedor no seu início de operação terá capacidade para alcançar as taxas de 17,5 Gbps e 8,75 Gbps de *downlink* e *uplink*, respectivamente. Como há uma fibra reserva para cada caixa de emenda implantada, a rede poderá possuir 14 CEO's e as taxas podem chegar a 35 Gbps e 17.5 Gbps de *downlink* e *uplink*, respectivamente. Distribuindo essa capacidade pelo o número máximo de assinantes com acesso simultâneos, então cada cliente terá capacidade de conexão dedicada de 40 Mbps.

No ato de definir as rotas dos cabos ópticos, foram encontrados três locais que necessitam implantação de novos postes, sendo de inteira responsabilidade do proprietário da infraestrutura. Os materiais que serão utilizados para implantação da infraestrutura externa, ou seja, a estrutura de rua, esta listada também no Anexo C.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso foi estudado uma densa fundamentação teórica que embasa um sistema de comunicação óptica, iniciando pelos princípios básicos da constituição da luz, as leis que regem o comportamento da luz dentro da fibra óptica, perfis dos tipos de fibras ópticas juntamente com suas principais características, rede PON e seus componentes, finalizando com o projeto de uma rede óptica passiva gigabit.

O embasamento teórico fundamentado neste trabalho, foi crucial para o desenvolvimento do mesmo, de modo que, o estudo realizado trouxe desde os conhecimentos básicos a avançados acerca do princípio funcional de uma comunicação óptica, trazendo assim, competências importantes a respeito de tudo que foi abordado. Para solidificar o estudo, o projeto prático consolidou o entendimento proporcionando assim, mais confiança a respeito do tema.

Em termos práticos, um sistema de comunicação óptica na topologia GPON possui muitas características positivas para o cenário atual que a cada dia demanda mais banda. Dados, voz e vídeo, são os serviços que diariamente melhoram suas qualidades, acarretando numa maior necessidade de banda. A qualidade dos serviços no usuário final também estão atreladas à transmissão destes. As fibras ópticas são imunes a interferências exteriores promovendo uma excelente qualidade na transmissão dos serviços ofertados.

O projeto da rede GPON para uma pequena cidade do norte do Ceará foi inovador, uma vez que as redes de comunicação já instaladas não utilizam fibra óptica como o meio de transmissão de informações. Esta rede estará preparada para o crescimento da demanda pelos próximos 20 anos com operação sem gargalo. Além de suportar a operação de TV, tanto em definição HD como também em resolução 4K a rede supre tais necessidades com eficiência. Assim, este sistema projetado trará um bom contentamento dos usuários finais, visto que, estes irão usufruir de serviços de qualidade e com maior rapidez.

## REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. P. **SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO POR FIBRA ÓPTICA**. 4ª edição. ed. [S.l.]: Elsevier, 2014. volume.
- ALTAHIR, H. A. A. **PERFORMANCE EVALUATION OF GIGABIT PASSIVE OPTICAL NETWORK (GPON) ACCESS TECHNOLOGY**. 1-63 p. Dissertação (Mestrado) — University Of Khartoum, Outubro 2017.
- AMAZONAS, J. R. de A. **Projeto de sistemas de comunicações ópticas**. 1ª edição. ed. [S.l.]: Manole, 2005. volume 1.
- AMERICA, S. by the O. S. O. **Handbook of Optics, Fundamentals, Techniques, and Design**. 2ª edição. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill, INC, 1995. volume 2. 310 p.
- ARAÚJO, A. A. R. D. Portas lógicas totalmente Ópticas baseadas em fibras de cristal fotônico dual core. In: SBRT. **XXXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES**. [S.l.], 2015. p. 593–595.
- BARRETO, R. G. Redes ftx no brasil. In: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **DISSERTAÇÃO**. [S.l.], 2014. p. 10–45.
- CARDOSO, R. A. Proposta, simulação e testes de arquitetura para redes ópticas passivas gpon e xg-pon. In: UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. [S.l.], 2015. p. 6–7.
- EFURUKAWA.COM. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.efurukawa.com>>.
- FERREIRA, A. D. C. Estudo numérico do acoplador duplo simétrico de fibras Ópticas operando com ppm e pam para obtenção de portas lógicas. In: UFC. [S.l.], 2008. p. 35–50.
- GONÇALVES, A. M. Análise da propagação de impulsos em fibras Ópticas. In: UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA. [S.l.], 2012.
- IBGE. **Moraújo**. 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/moraujo/panorama>>.
- IFSC. **Sistemas de Comunicações Ópticas**. 2014. Disponível em: <[http://www.sj.ifsc.edu.br/~mdoniak/SistemasOpticos/ComunicacoesOpticas\\_1.pdf](http://www.sj.ifsc.edu.br/~mdoniak/SistemasOpticos/ComunicacoesOpticas_1.pdf)>.
- ISP BLOG. **PC e APC: Principais características de cada Conector Óptico**. 2016. Disponível em: <<https://www.ispblog.com.br/2016/11/11/pc-e-apc-principais-caracteristicas-de-cada-conector-optico/>>.
- KEISER, G. **Comunicações por Fibras Ópticas**. 4ª edição. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill, bookman, 2014. volume.
- MADEIRA, A. V. **Fibras Ópticas – Características e os principais tipos**. 2011. Disponível em: <<http://www.stconsulting.com.br/telecom/fibras-opticas-%E2%80%93-93-do-conceito-a-aplicacao-%E2%80%93-93-parte-2-tipos-fibras-e-cabos>>.
- NORDESTE, D. do. **Mercado de banda larga deve crescer 30% no CE**. 2018. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/negocios/mercado-de-banda-larga-deve-crescer-30-no-ce-1.1922522>>.

OLIVEIRA, E. F. D. Projeto de rede Óptica em Âmbito municipal com sistema fttb e aplicação gpon. In: CENTRO UNIVERSITÁRIO CATÓLICA DO QUIXADÁ. [S.l.], 2017. p. 4–20.

OPTOLINK.COM.BR. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.optolink.com.br/?m=produto-detahes&uid=42>>.

PLA, J. S. A. **Design of Passive Optical Network**. 1–147 p. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, MAIO 2011.

RODRIGUES FRANCISCO TEIXEIRA, J. S. M. A. S. S. B. **Evolução das redes de comunicação**. 2015.

SANTOS, A. P. M. dos. O direito fundamental à internet. In: ESCOLA DA MAGISTRATURA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. [S.l.], 2013. p. 20–26.

SANTOS, W. da S. Refração, as velocidades da luz e metamateriais. In: UFRJ. [S.l.], 2011. p. 34–36.

SILVA, R. D. Implantação de uma rede de acesso gpon. In: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANA. [S.l.], 2012. p. 11–50.

UFSC, M. Polarização. In: UFSC. **Polarização**. [S.l.]. p. 1–8.

ULABY, F. T. **Eletromagnetismo para Engenheiros**. 1ª edição. ed. [S.l.]: Bookman, 2007. volume 1.

ZILIO, S. C. **ÓPTICA MODERNA FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES**. 1ª edição. ed. [S.l.]: Instituto de Física de São Carlos Universidade de São Paulo, 2009. volume.

## ANEXO A – PLANO DE FUSÃO

### Ramal 07

Fibra verde do *Backbone* 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de emenda (CEO 07).

#### Cabo 1, 4 FO<sup>1</sup>: 2 Reservas

- A saída 01 do *splitter* da (CEO 07) faz fusão com a fibra verde do Cabo 1 do Ramal 07.
- A saída da fibra verde do Cabo 1 do Ramal 07 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 51).
- A saída 02 do *splitter* da (CEO 07) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 1 do Ramal 07.
- A saída da fibra amarela do Cabo 1 do Ramal 07 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 52).

#### Cabo 2, 2 FO: 1 Reserva

- A saída 03 do *splitter* da (CEO 07) faz fusão com a fibra verde do Cabo 2 do Ramal 07.
- A saída da fibra verde do Cabo 2 do Ramal 07 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 53).

#### Cabo 3, 2 FO: 1 Reserva

- A saída 04 do *splitter* da (CEO 07) faz fusão com a fibra verde do Cabo 3 do Ramal 07.
- A saída da fibra verde do Cabo 3 do Ramal 07 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 54).

#### Cabo 4, 8 FO: 4 Reservas

- A saída 05 do *splitter* da (CEO 07) faz fusão com a fibra verde do Cabo 4 do Ramal 07.
- A saída da fibra verde do Cabo 4 do Ramal 07 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 50).
- A saída 06 do *splitter* da (CEO 07) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 4 do Ramal 07.
- A saída 07 do *splitter* da (CEO 07) faz fusão com a fibra branca do Cabo 4 do Ramal 07.
- A saída 08 do *splitter* da (CEO 07) faz fusão com a fibra azul do Cabo 4 do Ramal 07.
- A saída da fibra amarela do Cabo 4 do Ramal 07 faz fusão com a fibra verde do Cabo 5 na caixa de atendimento óptico (CTO 50).
- A saída da fibra branca do Cabo 4 do Ramal 07 faz fusão com a fibra amarela do Cabo 5 na caixa de atendimento óptico (CTO 50).

---

<sup>1</sup> FO: Fibra Óptica

- A saída da fibra azul do Cabo 4 do Ramal 07 faz fusão com a fibra verde do Cabo 6 na caixa de atendimento óptico (CTO 50).

**Cabo 5, 4 FO: 2 Reservas**

- A saída da fibra verde do Cabo 5 do Ramal 07 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 55).
- A saída da fibra amarela do Cabo 5 do Ramal 07 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 56).

**Cabo 6, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída da fibra verde do Cabo 6 do Ramal 07 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 49).

**Ramal 06**

Fibra amarela do *Backbone* 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de emenda (CEO 06).

**Cabo 1, 8 FO: 4 Reservas**

- A saída 01 do *splitter* da (CEO 06) faz fusão com a fibra verde do Cabo 1 do Ramal 06.
- A saída da fibra verde do Cabo 1 do Ramal 06 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 45).
- A saída 02 do *splitter* da (CEO 06) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 1 do Ramal 06.
- A saída da fibra amarela do Cabo 1 do Ramal 06 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 46).
- A saída 03 do *splitter* da (CEO 06) faz fusão com a fibra branca do Cabo 1 do Ramal 06.
- A saída da fibra branca do Cabo 1 do Ramal 06 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 47).
- A saída 04 do *splitter* da (CEO 06) faz fusão com a fibra azul do Cabo 1 do Ramal 06.
- A saída da fibra azul do Cabo 1 do Ramal 06 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 48).

**Cabo 2, 8 FO: 4 Reservas**

- A saída 05 do *splitter* da (CEO 06) faz fusão com a fibra verde do Cabo 2 do Ramal 06.
- A saída da fibra verde do Cabo 2 do Ramal 06 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 41).
- A saída 06 do *splitter* da (CEO 06) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 2 do Ramal 06.  
item A saída da fibra amarela do Cabo 2 do Ramal 06 faz fusão com a entrada do *splitter*

da caixa de atendimento óptico (CTO 42).

- A saída 07 do *splitter* da (CEO 06) faz fusão com a fibra branca do Cabo 2 do Ramal 06.
- A saída 08 do *splitter* da (CEO 06) faz fusão com a fibra azul do Cabo 2 do Ramal 06.
- A saída da fibra branca do Cabo 2 do Ramal 06 faz fusão com a fibra verde do Cabo 3 na caixa de atendimento óptico (CTO 42).
- A saída da fibra azul do Cabo 2 do Ramal 06 faz fusão com a fibra verde do Cabo 4 na caixa de atendimento óptico (CTO 42).

**Cabo 3, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída da fibra verde do Cabo 3 do Ramal 06 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 44).

**Cabo 4, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída da fibra verde do Cabo 4 do Ramal 06 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 43).

**Ramal 05**

Fibra branca do *Backbone* 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de emenda (CEO 05).

**Cabo 1, 4 FO: 2 Reservas**

- A saída 01 do *splitter* da (CEO 05) faz fusão com a fibra verde do Cabo 1 do Ramal 05.
- A saída da fibra verde do Cabo 1 do Ramal 05 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 34).
- A saída 02 do *splitter* da (CEO 05) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 1 do Ramal 05.
- A saída da fibra amarela do Cabo 1 do Ramal 05 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 33).

**Cabo 2, 6 FO: 3 Reservas**

- A saída 03 do *splitter* da (CEO 05) faz fusão com a fibra verde do Cabo 2 do Ramal 05.
- A saída da fibra verde do Cabo 2 do Ramal 05 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 35).
- A saída 04 do *splitter* da (CEO 05) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 2 do Ramal 05.
- A saída da fibra amarela do Cabo 2 do Ramal 05 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 36).
- A saída 05 do *splitter* da (CEO 05) faz fusão com a fibra branca do Cabo 2 do Ramal 05.
- A saída da fibra branca do Cabo 2 do Ramal 05 faz fusão com a entrada do *splitter* da



caixa de atendimento óptico (CTO 37).

**Cabo 3, 6 FO: 3 Reservas**

- A saída 06 do *splitter* da (CEO 05) faz fusão com a fibra verde do Cabo 3 do Ramal 05.
- A saída da fibra verde do Cabo 3 do Ramal 05 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 40).
- A saída 07 do *splitter* da (CEO 05) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 3 do Ramal 05.
- A saída da fibra amarela do Cabo 3 do Ramal 05 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 39).
- A saída 08 do *splitter* da (CEO 05) faz fusão com a fibra branca do Cabo 3 do Ramal 05.
- A saída da fibra branca do Cabo 3 do Ramal 05 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 38).

**Ramal 04**

Fibra azul do *Backbone* 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de emenda (CEO 04).

**Cabo 1, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída 01 do *splitter* da (CEO 04) faz fusão com a fibra verde do Cabo 1 do Ramal 04.
- A saída da fibra verde do Cabo 1 do Ramal 04 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 25).

**Cabo 2, 4 FO: 2 Reservas**

- A saída 02 do *splitter* da (CEO 04) faz fusão com a fibra verde do Cabo 2 do Ramal 04.
- A saída da fibra verde do Cabo 2 do Ramal 04 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 26).
- A saída 03 do *splitter* da (CEO 04) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 2 do Ramal 04.
- A saída da fibra amarela do Cabo 2 do Ramal 04 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 27).

**Cabo 3, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída 04 do *splitter* da (CEO 04) faz fusão com a fibra verde do Cabo 3 do Ramal 04.
- A saída da fibra verde do Cabo 3 do Ramal 04 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 28).

**Cabo 4, 8 FO: 4 Reservas**

- A saída 05 do *splitter* da (CEO 04) faz fusão com a fibra verde do Cabo 4 do Ramal 04.
- A saída 06 do *splitter* da (CEO 04) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 4 do Ramal 04.
- A saída 07 do *splitter* da (CEO 04) faz fusão com a fibra branco do Cabo 4 do Ramal 04.
- A saída 08 do *splitter* da (CEO 04) faz fusão com a fibra azul do Cabo 4 do Ramal 04.
- A saída da fibra verde do Cabo 4 do Ramal 04 faz fusão com a fibra verde do Cabo 5 na mini caixa de emenda óptica (MINI CEO 01).
- A saída da fibra amarela do Cabo 4 do Ramal 04 faz fusão com a fibra verde do Cabo 6 na mini caixa de emenda óptica (MINI CEO 01).
- A saída da fibra branca do Cabo 4 do Ramal 04 faz fusão com a fibra amarela do Cabo 6 na mini caixa de emenda óptica (MINI CEO 01).
- A saída da fibra azul do Cabo 4 do Ramal 04 faz fusão com a fibra branca do Cabo 6 na mini caixa de emenda óptica (MINI CEO 01).

**Cabo 5, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída da fibra verde do Cabo 5 do Ramal 04 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 29).

**Cabo 6, 6 FO: 3 Reservas**

- A saída da fibra verde do Cabo 6 do Ramal 04 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 30).
- A saída da fibra amarela do Cabo 6 do Ramal 04 faz fusão com a fibra verde do Cabo 7 na caixa de atendimento óptico (CTO 30).
- A saída da fibra branca do Cabo 6 do Ramal 04 faz fusão com a fibra verde do Cabo 8 na caixa de atendimento óptico (CTO 30).

**Cabo 7, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída da fibra verde do Cabo 7 do Ramal 04 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 31).

**Cabo 8, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída da fibra verde do Cabo 8 do Ramal 04 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 32).

**Ramal 02**

Fibra verde do *Backbone* 02 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de emenda (CEO 02).

**Cabo 1, 4 FO: 2 Reservas**

- A saída 01 do *splitter* da (CEO 02) faz fusão com a fibra verde do Cabo 1 do Ramal 02.
- A saída da fibra verde do Cabo 1 do Ramal 02 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 12).
- A saída 02 do *splitter* da (CEO 02) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 1 do Ramal 02.
- A saída da fibra amarela do Cabo 1 do Ramal 02 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 16).

#### **Cabo 2, 6 FO: 3 Reservas**

- A saída 03 do *splitter* da (CEO 02) faz fusão com a fibra verde do Cabo 2 do Ramal 02.
- A saída da fibra verde do Cabo 2 do Ramal 02 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 13).
- A saída 04 do *splitter* da (CEO 02) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 2 do Ramal 02.
- A saída da fibra amarela do Cabo 2 do Ramal 02 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 14).
- A saída 05 do *splitter* da (CEO 02) faz fusão com a fibra branca do Cabo 2 do Ramal 02.
- A saída da fibra branca do Cabo 2 do Ramal 02 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 15).

#### **Cabo 3, 6 FO: 3 Reservas**

- A saída 06 do *splitter* da (CEO 02) faz fusão com a fibra verde do Cabo 3 do Ramal 02.
- A saída da fibra verde do Cabo 3 do Ramal 02 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 11).
- A saída 07 do *splitter* da (CEO 02) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 3 do Ramal 02.
- A saída da fibra amarela do Cabo 3 do Ramal 02 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 10).
- A saída 08 do *splitter* da (CEO 02) faz fusão com a fibra branca do Cabo 3 do Ramal 02.
- A saída da fibra branca do Cabo 3 do Ramal 02 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 09).

#### **Ramal 01**

Fibra amarela do *Backbone* 02 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de emenda (CEO 01).

#### **Cabo 1, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída 01 do *splitter* da (CEO 01) faz fusão com a fibra verde do Cabo 1 do Ramal 01.
- A saída da fibra verde do Cabo 1 do Ramal 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa

de atendimento óptico (CTO 08).

**Cabo 2, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída 02 do *splitter* da (CEO 01) faz fusão com a fibra verde do Cabo 2 do Ramal 01.
- A saída da fibra verde do Cabo 2 do Ramal 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 07).

**Cabo 3, 12 FO: 6 Reservas**

- A saída 03 do *splitter* da (CEO 01) faz fusão com a fibra verde do Cabo 3 do Ramal 01.
- A saída da fibra verde do Cabo 3 do Ramal 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 06).
- A saída 04 do *splitter* da (CEO 01) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 3 do Ramal 01.
- A saída da fibra amarela do Cabo 3 do Ramal 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 05).
- A saída 05 do *splitter* da (CEO 01) faz fusão com a fibra branca do Cabo 3 do Ramal 01.
- A saída da fibra branca do Cabo 3 do Ramal 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 03).
- A saída 06 do *splitter* da (CEO 01) faz fusão com a fibra azul do Cabo 3 do Ramal 01.
- A saída 07 do *splitter* da (CEO 01) faz fusão com a fibra vermelha do Cabo 3 do Ramal 01.
- A saída 08 do *splitter* da (CEO 01) faz fusão com a fibra violeta do Cabo 3 do Ramal 01.
- A saída da fibra azul do Cabo 3 do Ramal 01 faz fusão com a fibra verde do Cabo 4 na caixa de atendimento óptico (CTO 03).
- A saída da fibra vermelha do Cabo 3 do Ramal 01 faz fusão com a fibra verde do Cabo 5 na caixa de atendimento óptico (CTO 03).
- A saída da fibra violeta do Cabo 3 do Ramal 01 faz fusão com a fibra amarela do Cabo 5 na caixa de atendimento óptico (CTO 03).

**Cabo 4, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída da fibra verde do Cabo 4 do Ramal 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 02).

**Cabo 5, 4 FO: 2 Reservas**

- A saída da fibra verde do Cabo 5 do Ramal 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 04).
- A saída da fibra amarela do Cabo 5 do Ramal 01 faz fusão com a entrada do *splitter* da

caixa de atendimento óptico (CTO 01).

### **Ramal 03**

Fibra branca do *Backbone* 02 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de emenda (CEO 03).

#### **Cabo 1, 4 FO: 2 Reservas**

- A saída 01 do *splitter* da (CEO 03) faz fusão com a fibra verde do Cabo 1 do Ramal 03.
- A saída da fibra verde do Cabo 1 do Ramal 03 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 19).
- A saída 02 do *splitter* da (CEO 03) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 1 do Ramal 03.
- A saída da fibra amarela do Cabo 1 do Ramal 03 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 20).

#### **Cabo 2, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída 03 do *splitter* da (CEO 03) faz fusão com a fibra verde do Cabo 2 do Ramal 03.
- A saída da fibra verde do Cabo 2 do Ramal 03 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 21).

#### **Cabo 3, 12 FO: 6 Reservas**

- A saída 04 do *splitter* da (CEO 03) faz fusão com a fibra verde do Cabo 3 do Ramal 03.
- A saída 05 do *splitter* da (CEO 03) faz fusão com a fibra amarela do Cabo 3 do Ramal 03.
- A saída 06 do *splitter* da (CEO 03) faz fusão com a fibra branca do Cabo 3 do Ramal 03.
- A saída 07 do *splitter* da (CEO 03) faz fusão com a fibra azul do Cabo 3 do Ramal 03.
- A saída 08 do *splitter* da (CEO 03) faz fusão com a fibra vermelha do Cabo 3 do Ramal 03.
- A saída da fibra verde do Cabo 3 do Ramal 03, faz fusão com a fibra verde do Cabo 4 na mini caixa de emenda óptica (MINI CEO 02).
- A saída da fibra amarela do Cabo 3 do Ramal 03 faz fusão com a fibra verde do Cabo 5 na mini caixa de emenda óptica (MINI CEO 02).
- A saída da fibra branca do Cabo 3 do Ramal 03 faz fusão com a fibra verde do Cabo 6 na mini caixa de emenda óptica (MINI CEO 02).
- A saída da fibra azul do Cabo 3 do Ramal 03 faz fusão com a fibra verde do Cabo 7 na mini caixa de emenda óptica (MINI CEO 02).
- A saída da fibra vermelha do Cabo 3 do Ramal 03 faz fusão com a fibra amarela do Cabo 7 na mini caixa de emenda óptica (MINI CEO 02).

**Cabo 4, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída da fibra verde do Cabo 4 do Ramal 03 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 22).

**Cabo 5, 2 FO: 1 Reserva**

- A saída da fibra verde do Cabo 5 do Ramal 03 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 24).

**Cabo 6, 2 FO: 1 Reserva**

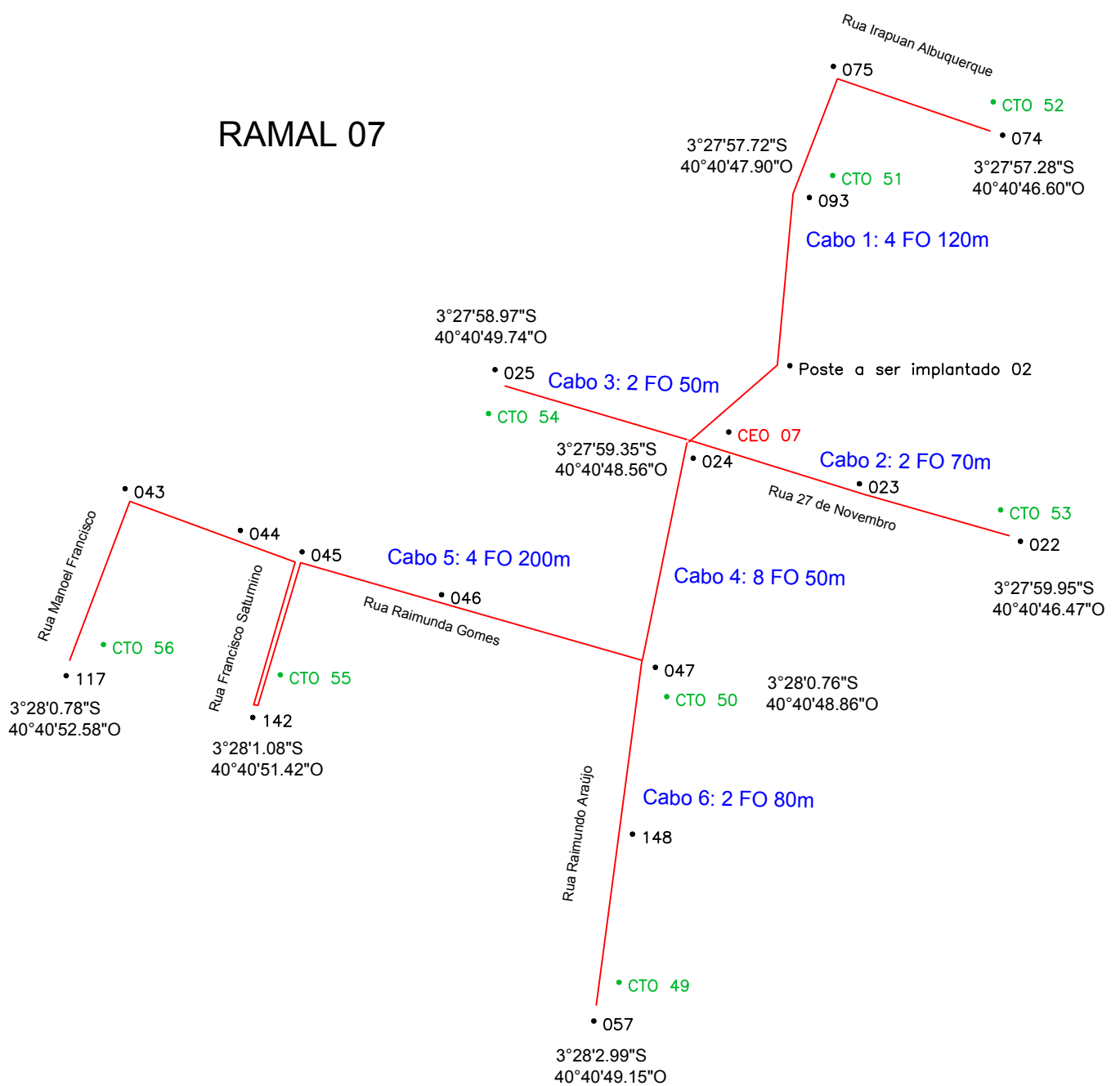
- A saída da fibra verde do Cabo 6 do Ramal 03 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 23).

**Cabo 7, 4 FO: 2 Reservas**

- A saída da fibra verde do Cabo 7 do Ramal 03 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 18).
- A saída da fibra amarela do Cabo 7 do Ramal 03 faz fusão com a entrada do *splitter* da caixa de atendimento óptico (CTO 17).

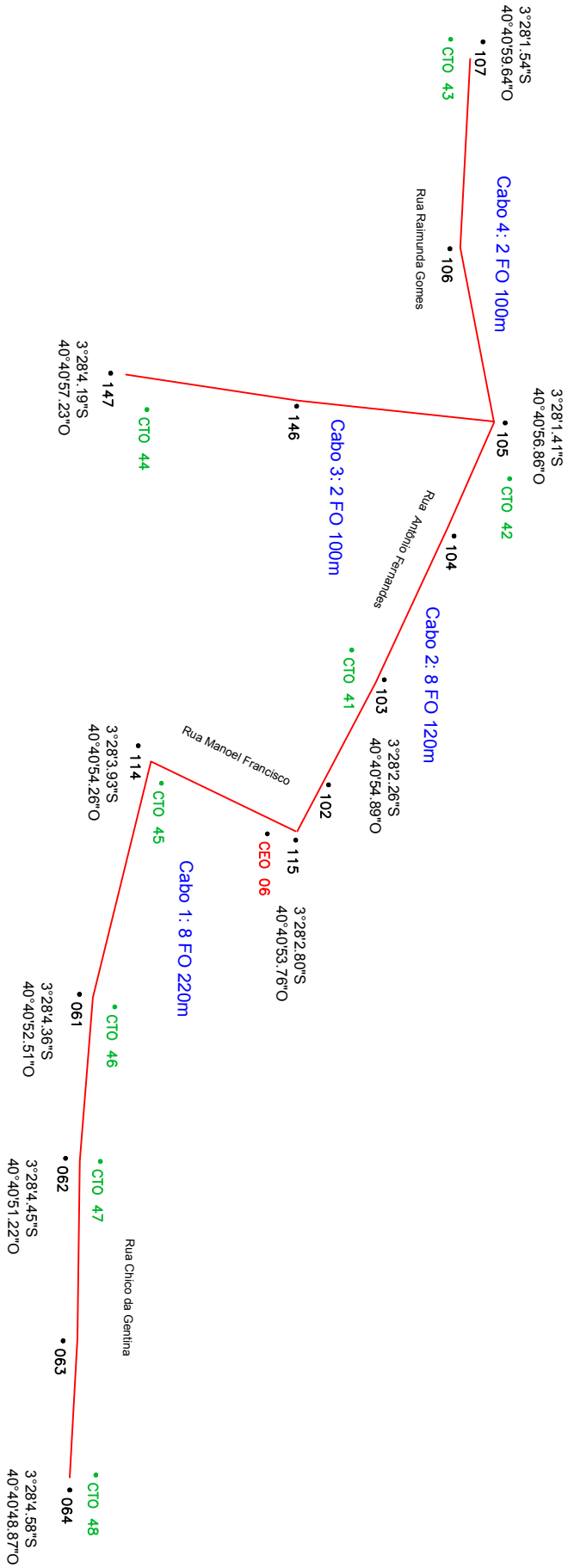
**ANEXO B – DIAGRAMA DOS RAMAIS**

# RAMAL 07

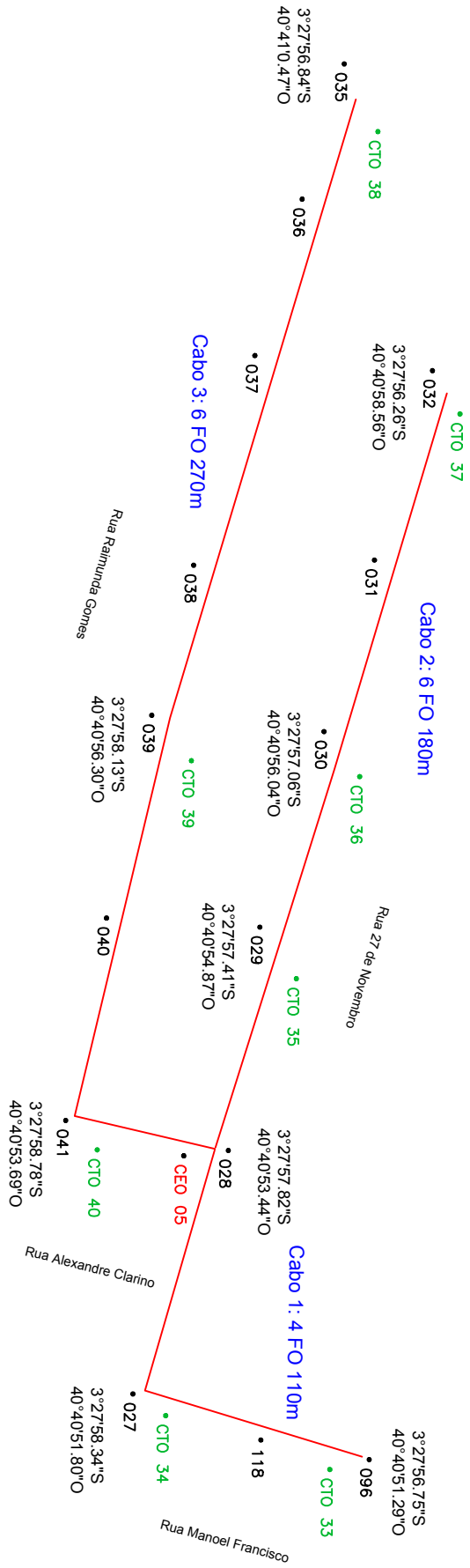




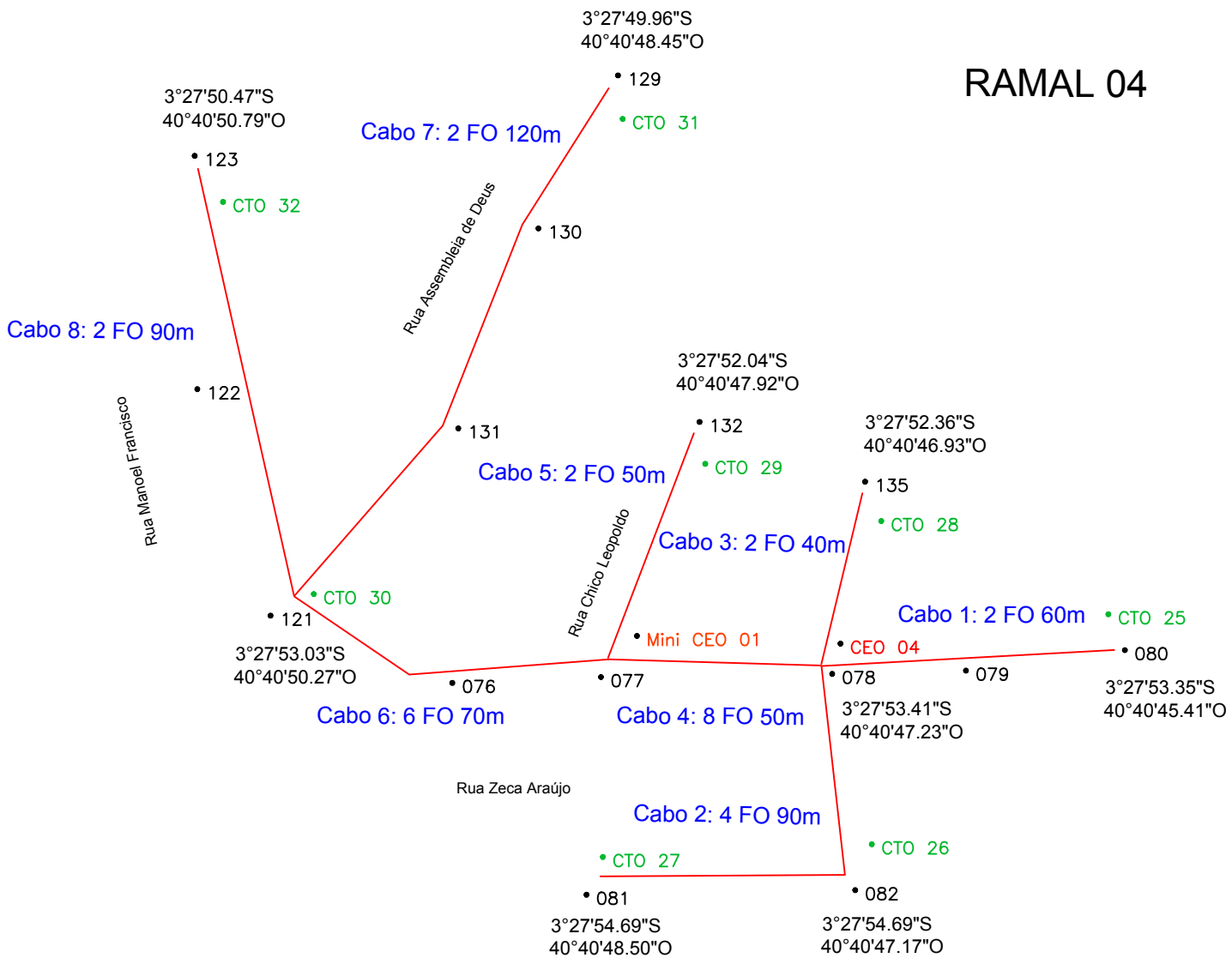
RAMAL 06



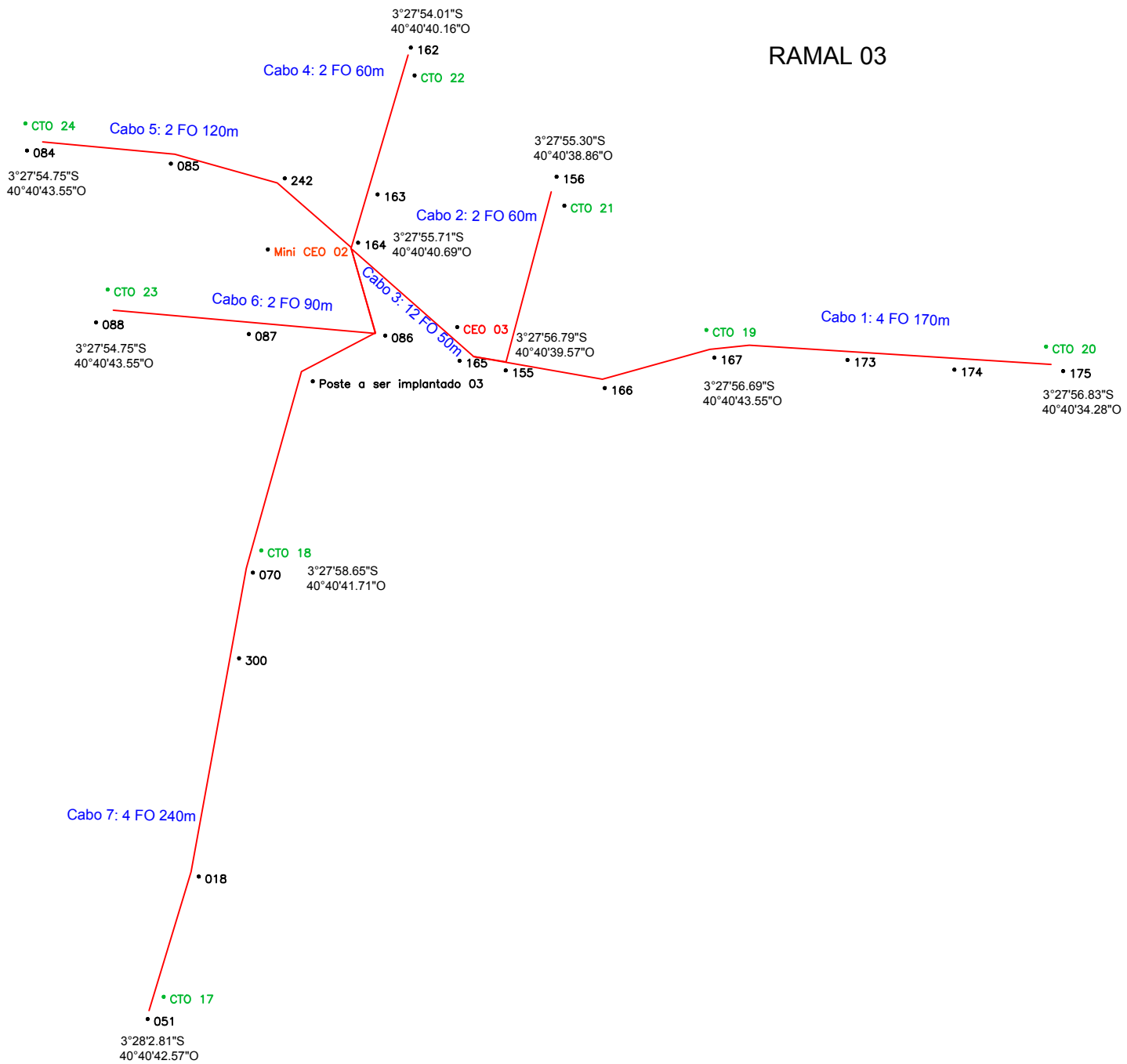
# RAMAL 05



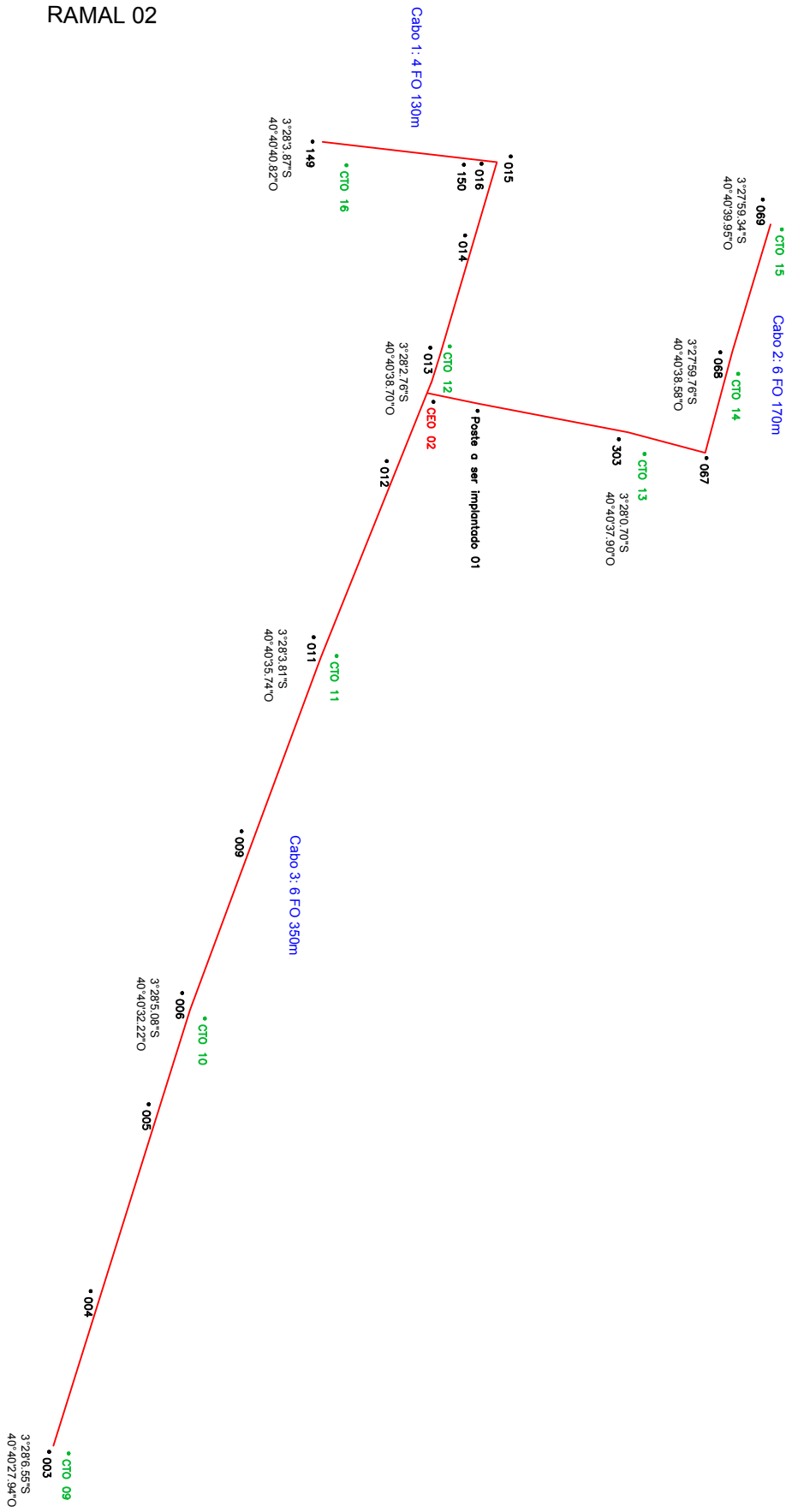
# RAMAL 04



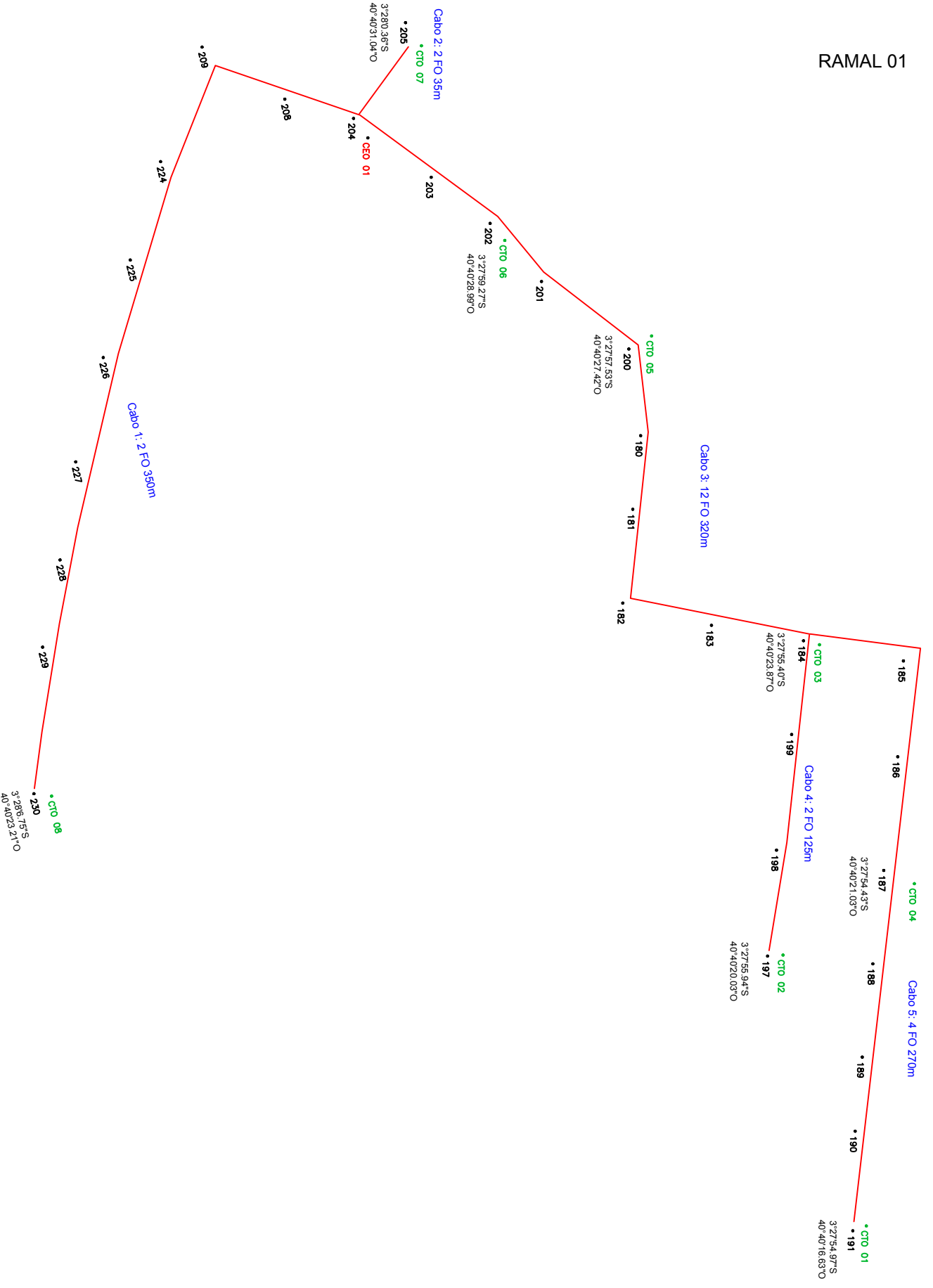
# RAMAL 03



# RAMAL 02



# RAMAL 01



**ANEXO C – MATERIAIS**

<b>Ancoragem simples:</b>	<b>22</b>	
01 abraçadeira para poste BAP	1	22
01 Suporte reforçado para BAP	1	22
01 parafuso M12x35 mm	1	22
01 Olhal reto M12	1	22
01 alça pré-formada (importante verificar a espessura do cabo)	1	22

<b>Ancoragem dupla:</b>	<b>37</b>	
01 abraçadeira para poste BAP	1	37
02 Suporte reforçado para BAP	2	74
02 parafuso M12x35 mm	2	74
02 Olhal reto M12	2	74
02 alça pré-formada (importante verificar a espessura do cabo)	2	74

<b>Ancoragem tripla:</b>	<b>15</b>	
01 abraçadeira para poste BAP	1	6
03 Suporte reforçado para BAP	3	45
03 parafuso M12x35 mm	3	45
03 Olhal reto M12	3	45
03 alça pré-formada (importante verificar a espessura do cabo)	3	45

<b>Ancoragem quádrupla:</b>	<b>6</b>	
01 abraçadeira para poste BAP	1	2
04 Suporte reforçado para BAP	4	8
04 parafuso M12x35 mm	4	8
04 Olhal reto M12	4	8
04 alça pré-formada (importante verificar a espessura do cabo)	4	8

<b>Passagem do cabo</b>	<b>70</b>	
01 x suporte dielétrico Cód. FDS60	70	
01 x Abraçadeira ajustável para poste	70	
01 x Suporte reforçado para Bap	70	
01 x Parafuso M12x35mm	70	

<b>Poste a ser Implantado</b>	<b>3</b>	
01 x Poste 9/150	3	

<b>RESUMO DAS FERRAGENS</b>		
Abraçadeira ajustável no poste BAP	263	
Suporte reforçado para BAP	219	
01 parafuso M12x35 mm	219	<b>SUPA</b>
01 Olhal reto M12	149	<b>219</b>
01 esticador		
01 x suporte dielétrico para sustentação	70	
alça pré-formada para cabo compacto - Aplicação 6,80 mm - 7,40 mm REF SN0959	199	