

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAPÁ –
IFAP – CAMPUS MACAPÁ
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM REDES DE COMPUTADORES

ANDRÉ LUIZ OLIVEIRA DA SILVA
EDES DA SILVA MENDES

REDES HÍBRIDAS (ÓPTICAS E SEM FIO): Um levantamento conciso de possibilidades
de arquiteturas de rede para cidades inteligentes.

Macapá/AP

2021

ANDRÉ LUIZ OLIVEIRA DA SILVA
EDES DA SILVA MENDES

REDES HÍBRIDAS (ÓPTICAS E SEM FIO): Um levantamento conciso de possibilidades de arquiteturas de rede para cidades inteligentes.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso superior de tecnologia em redes de computadores, do Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá – Ifap, como requisito avaliativo para obtenção de título de tecnólogo em redes de computadores. Orientador: Prof. Dr. Klenilmar Dias Lopes.

Macapá/AP

2021

Biblioteca Institucional - IFAP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- S586r Silva, André Luiz Oliveira da
Redes híbridas (ópticas e sem fio): um levantamento conciso de possibilidades de arquiteturas de rede para cidades inteligentes. / André Luiz Oliveira da Silva, Edes da Silva Mendes. - Macapá, 2021.
76 f.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá, Campus Macapá, Curso de Tecnologia em Redes de Computadores, 2021.
- Orientador: Dr. Klenilmar Dias Lopes.
1. Redes híbridas. 2. Arquiteturas de redes. 3. Cidades inteligentes. I. Mendes, Edes da Silva. I. Lopes, Dr. Klenilmar Dias, orient. II. Título.

ANDRÉ LUIZ OLIVEIRA DA SILVA

EDES DA SILVA MENDES

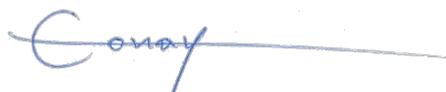
REDES HÍBRIDAS (ÓPTICAS E SEM FIO): Um levantamento conciso de possibilidades de arquiteturas de rede para cidades inteligentes.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso superior de tecnologia em redes de computadores, do Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Amapá – Ifap, como requisito avaliativo para obtenção de título de tecnólogo em redes de computadores. Orientador: Prof. Dr. Klenilmar Dias Lopes.

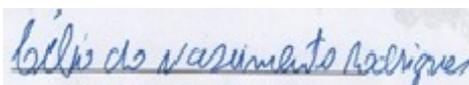
BANCA EXAMINADORA



Prof. Klenilmar Lopes Dias



Prof. Eonay Barbosa Gurjão



Prof. Célio do Nascimento Rodrigues



Prof. Klessis Lopes Dias

Aprovada(o) em: 29/04/2021

Nota: 9,75

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus acima de tudo, que vem nos dando força, sabedoria e vontade de vencer os obstáculos;

Agradecemos às nossas famílias pelo apoio, carinho e compreensão, que nos fortalece a prosseguir em frente em busca de conhecimento em nossa área de atuação e uma vida melhor perante as pessoas ao nosso redor;

Ao nosso orientador Klenilmar Dias por ter aceito esse desafio de nos orientar e ajudar a desenvolver esse trabalho de conclusão de curso.

A instituição IFAP e todas as pessoas que nos ajudaram direta e indiretamente.

RESUMO

Atualmente existem diversos projetos e tecnologias com o foco em cidades inteligentes ou *smart cities*, com o objetivo de expandir a integração entre as instituições públicas e privadas, solucionando ou minimizando problemas básicos e complexos do nosso cotidiano. Aplicações direcionadas a segurança, educação, saúde, energia, meio ambiente, mobilidade e outros. Para que se torne possível implementar soluções para essas áreas é necessário que no *background*, haja uma infraestrutura de telecomunicações à prova de futuro e com convergência de diferentes serviços sobre a mesma rede. Este trabalho tem como direcionamento apresentar as principais tecnologias de rede acesso híbrida (Óptica-sem fio), sendo essa, a arquitetura mais utilizada em cidades inteligentes, devido a alta capacidade de banda e velocidade da fibra óptica e a flexibilidade e onipresença da rede *wireless*. Abordando também, de maneira mais superficial, várias tecnologias de redes acesso, variações FTTX e sem fio, múltiplo acesso, cidades inteligentes, redes AON e PON e equipamentos passivos e ativos, que compõem uma infraestrutura de telecomunicações.

Palavras-chave: Redes híbridas. Cidades inteligentes. Arquitetura de rede. MARIN. GROWNet.

ABSTRACT

There are currently several projects and technologies focusing on smart cities, with the aim of expanding the integration between public and private institutions, solving or minimizing basic and complex problems of our daily lives. Applications aimed at safety, education, health, energy, environment, mobility and others. To make it possible to implement solutions for these areas, it is necessary that in the background, there is a future-proof telecommunications infrastructure with the convergence of different services over the same network. This work aims to present the main technologies of hybrid access network (Optical-wireless), being this, the topology most used in smart cities, due to the high capacity of bandwidth and speed of the optical fiber and the flexibility and ubiquity of the wireless network. Also addressing, in a more superficial way, various access network technologies, FTTX and wireless variations, multiple access, smart cities, AON and PON networks and passive and active equipment, which make up a telecommunications infrastructure.

Keywords: Hybrid networks. Smart cities. Network architecture. MARIN. GROWNet.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de conexão DSL.....	19
Figura 2 – Exemplo de conexão cable modem.....	19
Figura 3 – PLC algumas aplicações.....	20
Figura 4 – Conexões wireless.....	20
Figura 5 – Comparação 3G, 4G e 5G.....	21
Figura 6 – Conexão via satélite.....	21
Figura 7 – Algumas aplicações em fibra óptica.....	22
Figura 8 – Topologia em anel.....	25
Figura 9 – Topologia em árvore.....	25
Figura 10 – Topologia em barramento.....	26
Figura 11 – Arquitetura FTTCab.....	26
Figura 12 – Arquitetura FTTC.....	27
Figura 13 – Arquitetura FTTH.....	28
Figura 14 – Arquitetura FTTB.....	28
Figura 15 – Arquitetura FTTA.....	29
Figura 16 – Arquitetura FTTAnt.....	29
Figura 17 – Arquitetura FTTN.....	30
Figura 18 – Time slot em TDMA.....	32
Figura 19 – Multiplexação WDM.....	32
Figura 20 – Comparação entre CWDM e DWDM.....	33
Figura 21 – Arquitetura APON.....	37
Figura 22 – Arqiterura BPON.....	37
Figura 23 – Arquitetura GPON.....	38
Figura 24 – Arquitetura EPON.....	38
Figura 25 – Arquitetura XG-PON2.....	41
Figura 26 – Arquitetura 10G-GPON.....	41
Figura 27 – Arquitetura WDM-PON.....	43
Figura 28 – Arquitetura 10G-EPON.....	43
Figura 29 – Arquitetura TWDM-PON.....	44
Figura 30 – OLT GPON.....	46
Figura 31 – Modelos de transceptores SFP e SFF.....	46

Figura 32 – Parte interna de uma ONU.....	47
Figura 33 – ONT GPON.....	47
Figura 34 – Caixa de emenda óptica.....	48
Figura 35 – Distribuidor óptico interno.....	48
Figura 36 – Splitter de 1:4.....	49
Figura 37 – Caixa de terminação óptica.....	49
Figura 38 – Splitter balanceado 1:2.....	50
Figura 39 – Splitter desbalanceado 90/10.....	50
Figura 40 – Redes sem fio.....	54
Figura 41 – Arquitetura MARIN sendo implantada.....	57
Figura 42 – Arquitetura MARIN.....	57
Figura 43 – Pilha de protocolos MARIN.....	58
Figura 44 – Hierarquia GROWNET.....	59
Figura 45 – Grade óptica GROWNET.....	59
Figura 46 – Célula de grade GROWNET.....	60
Figura 47 – Arquitetura FiWi.....	60
Figura 48 – Arquitetura FUTON.....	63
Figura 49 – Projeto FUTON.....	63
Figura 50 – Arquitetura WOBAN.....	65
Figura 51 – WOBAN em San francisco.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre tecnologias pon.....	44
Tabela 2 – Características dos modelos de transceptores ópticos.....	45
Tabela 3 – Comparação entre FSO e RoF.....	61
Tabela 4 – Comparação entre redes híbridas.....	65

LISTA DE SIGLAS

10G-EPON	10 Gigabit - Ethernet Passive Optical Network
10G-GPON	10 Gigabit Passive Optical Network
AP	Access Point
AON	Active Optical Network
APON	ATM Passive Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BPON	Broadband Passive Optical Network
CEO	Caixa de Emenda Óptica
CTO	Caixa de Terminação Óptica
CU	Central Unit
CO	Central Office
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
EPON	Ethernet Passive Optical Network
DIO	Distribuidor Óptico Interno
DSL	Digital Subscriber Line
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
FDM	Frequency Division Multiplexing
FIWI	Fiber-wireless
FUTON	Fiber-optic Networks For Distributed Extendible Heterogeneous Radio Architectures And Service Provisioning
FSAN	Full Service Access Networks
FTTA	Fiber To The Apartment
FTTAnt	Fiber To The Antenna
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The curb
FTTCab	Fiber To The cabinet
FTTF	Fiber To The Feeder
FTTD	Fiber To The Desk
FTTH	Fiber To The Home
FTTN	Fiber To The Neighborhood
FTTP	Fiber To The Premises
FTTX	Fiber To The X

GPON	Gigabit Passive Optic Network
GROWNET	Grid Reconfigurable Optical and Wireless Network
IA	Artificial Intelligence
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
IOT	Internet of Things
ISP	Internet Service Provider
ITU-T	International Telecommunication Union
LTE	Long Term Evolution
MARIN	Metro and Access Ring Integrated Network
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Line Terminal
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Units
PLC	Power line communication
PON	Passive Optical Network
POP	Passive Optical Network
RAU	Radio Access Units
TDMA	Time Divison Multiplexing Access
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
UDWDM	Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing
VoIP	Voice Over Internet Protocol
WPAN	Wireless Personal Area Network
WDM	Wavelength-Division Multiplexing
WDM-PON	Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WMN	Wireless Mesh Network
WOBAN	Wireless-Optical Broadband Access Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Problema da pesquisa.....	15
1.2	Justificativa.....	16
1.3	Objetivos.....	16
1.3.1	Geral:.....	16
1.3.2	Específicos:.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	Redes de acesso.....	18
2.1.1	DSL – Digital subscriber line.....	18
2.1.2	Modem a cabo (Cable modem).....	18
2.1.3	PLC – Power line communication.....	19
2.1.4	Wireless.....	19
2.1.5	Móveis 3G, 4G e 5G.....	20
2.1.6	Satélite.....	21
2.1.7	Fibras ópticas.....	22
2.2	Terminologias de rede.....	23
2.2.1	CO – Central office.....	23
2.2.2	Rede de longa distância.....	23
2.2.3	Rede feeder.....	23
2.2.4	Rede de distribuição óptica.....	23
2.2.5	Backbone.....	24
2.2.6	Backhaul.....	24
2.2.7	POP – Ponto de presença.....	24
2.3	Conexões em redes ópticas ftx.....	24
2.4	Versões do ftx (Fiber to the x).....	26
2.4.1	FTTCab – Fiber to the cabinet.....	26
2.4.2	FTTC – Fiber to the curb.....	27
2.4.3	FTTP – Fiber to the premises.....	27
2.4.4	FTTH – Fiber to the home.....	27
2.4.5	FTTB – Fiber to the building.....	28
2.4.6	FTTA – Fiber to the apartment.....	29

2.4.7	FTTAnt – Fiber to the antenna.....	29
2.4.8	FTTD – Fiber to the desk.....	30
2.4.9	FTTF – Fiber to the feeder.....	30
2.4.10	FTTN – Fiber to the neighborhood.....	30
2.5	Tecnologias de múltiplo acesso.....	31
2.5.1	FDM – Multiplexação por divisão de frequência.....	31
2.5.2	TDMA – Acesso múltiplo por divisão no tempo.....	31
2.5.3	WDM – Multiplexação por divisão do comprimento de onda.....	32
2.6	MPLS – Multi-protocol label switching.....	34
2.6.1	MPLS sobre wdm.....	34
2.7	Aon – Rede óptica ativa.....	35
2.8	Tecnologias de rede pon.....	35
2.8.1	Apon – Rede óptica passiva sobre modo de transferência assíncrona.....	36
2.8.2	Bpon – Rede óptica passiva banda larga.....	36
2.8.3	Epon – Rede óptica passiva ethernet.....	37
2.8.4	Gpon – Rede óptica passiva gigabit.....	38
2.9	Próximas gerações de rede pon.....	39
2.9.1	Xg-pon1.....	39
2.9.2	Xg-pon2.....	40
2.9.3	10G-Gpon – 10 Gigabit passive optical network.....	41
2.9.4	10G-Epon gigabit – Ethernet passive optical network.....	41
2.9.5	Wdm-pon – Wavelength division multiplexing passive optical network.....	42
2.9.6	Twdm-pon – Time wavelength division multiplexing passive optical networking	
	43	
2.10	Ativos de rede óptica.....	45
2.10.1	OLT – Optical line terminal.....	45
2.10.2	Módulo transceptor óptico.....	45
2.10.3	ONU – Optical network unit.....	46
2.10.4	ONT – Optical network terminal.....	46
2.11	Passivos de rede óptica.....	47
2.11.1	Fibra óptica.....	47
2.11.2	DIO – Distribuidor interno óptico.....	48
2.11.3	CEO – Caixa de emenda óptica.....	48
2.11.4	CTO – Caixa de terminação óptica.....	48

2.11.5	Divisores ópticos (Splitters).....	49
2.13	Cidades inteligentes.....	50
2.13.1	Algumas conectividades voltadas a cidades inteligentes.....	51
2.14	Tecnologias de acesso sem fio.....	54
2.14.1	Wpan – Wireless personal area network.....	54
2.14.2	Wlan – Wireless local area network.....	55
2.14.3	Wman – Wireless metropolitan area network.....	55
2.14.4	Wmn – Wireless mesh network.....	55
2.14.5	Wwan – Wireless wide area network.....	55
3	REDES DE ACESSO HÍBRIDAS ÓPTICA-SEM FIO.....	56
3.1	Marin – Metro and access ring integrated network.....	56
3.2	Grownet – Grid reconfigurable optical and wireless network.....	58
3.3	Fiwi – Fiber-wireless.....	61
3.4	Futon – Fiber-optic networks for distributed extendible heterogeneous radio architectures and service provisioning.....	63
3.5	Woban – Wireless-optical broadband access network.....	64
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	67
5	CRONOGRAMA.....	68
6	CONCLUSÃO.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Devido ao grande aumento em relação ao número de habitantes nas áreas urbanas, vários países vêm adotando medidas tecnológicas para que tornem suas cidades mais inteligentes, segundo a ONU (Organização das Nações Unidas) atualmente 55% da população mundial vive em áreas urbanas e que até em 2050 chegue a 70%. Buscando reduzir os impactos atuais e futuros com a crescente da população urbana, vários líderes de estado, empresas e etc, vem adotando o TIC (Tecnologia da informação e comunicação), para implementar nas cidades ou bairros que estão em construções voltadas para *smart cities* desde o início do projeto e, aperfeiçoando as cidades já existentes.

Com a crescente necessidade em trocar informações, automatizar tarefas para economia de tempo e recursos na vida pessoal, industrial e governamental e, também com a pandemia da COVID-19 em 2020/21, forçou com que a população, empresas e órgãos públicos adotassem medidas de isolamento social, exigindo mais da atual infraestrutura de telecomunicações algo que nunca tinha acontecido antes, segundo a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) o aumento no consumo de Internet no Brasil foi entre 40% e 50%.

As cidades inteligentes será inevitavelmente parte do futuro da humanidade, a IOT (Internet das Coisas), as redes 5G e emergentes, IA (Inteligência Artificial), IoV (Internet de Veículos), que décadas atrás eram somente ficção, já é realidade em nossas vidas atualmente, claro que ainda não está 100% aplicada no mundo mas é genuíno e, para que tudo isso se torne possível, é necessário que haja uma arquitetura híbrida (sem fio – óptica) capaz de atender a todo esse fluxo de dados.

1.1 Problema da pesquisa

Para que seja possível o desenvolvimento de cidades inteligentes é crucial que se tenha arquiteturas de redes com alto desempenho em vários aspectos e que não tenha muita poluição visual, atualmente há arquiteturas que oferecem a competência requisitada pelas *smarts cities*? As redes híbridas são as soluções ideias para as cidades inteligentes.

O que é rede híbrida?

O que são cidades inteligentes?

Quais são as possíveis arquiteturas de redes híbridas recomendadas para se implementar em cidades inteligentes?

1.2 Justificativa

Fazer um levantamento de soluções tecnológicas em telecomunicações que são ideais para atender as cidades inteligentes, abordando principalmente as arquiteturas de redes híbridas (sem fio – óptica), que atualmente são as melhores opções quando pensamos em largura de banda, velocidade, escalabilidade, baixa latência, conectividade onipresente e vários outros benefícios que elas oferecem.

Sem dúvidas a tecnologia óptica é o que se tem de melhor atualmente no tocante acesso à Internet na parte cabeada é a aplicação ideal de transporte em massa para atender as necessidades das cidades inteligentes, além do mais, nos últimos anos houve um grande aumento no consumo de serviços *streaming*, aparelhos que se adaptaram para a Internet das coisas, TVs *smarts* com resoluções *Full HD*, 4k e 8k, sensores para serviços externos e internos, que consomem bastante banda, claro que não são os únicos que necessita de muito tráfego, mas uma rede híbrida bem estruturada atende com certa facilidade essa demanda.

A tecnologia sem fio traz mais comodidade, organização, menos poluição visual, onipresença e principalmente dá a possibilidade de disponibilidade de acesso à Internet nas regiões onde é difícil chegar uma infraestrutura cabeada. Portanto a união dessas duas tecnologias é interessante para as cidades inteligentes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral:

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um apanhado básico das principais tecnologias relacionadas a Internet e, principalmente fazer um levantamento conciso de possibilidades de arquiteturas de redes híbridas voltadas para cidades inteligentes, apresentando os principais elementos que constitui essas aplicações.

1.3.2 Específicos:

Os objetivos específicos a serem atingidos são:

- Abordar as principais tecnologias relacionadas a Internet, antigas e atuais.
- Descrever algumas aplicações de cidades inteligentes.
- Fazer um levantamento conciso de arquiteturas de redes de acesso híbrido (sem fio – óptica).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo traz algumas teorias básicas, relacionadas ao tema proposto, para que haja um entendimento deste trabalho.

2.1 Redes de acesso

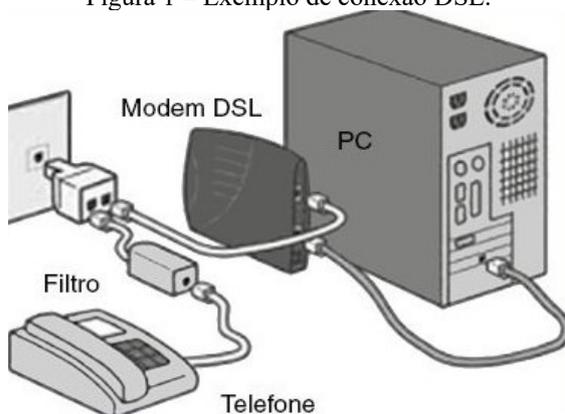
2.1.1 DSL – Digital subscriber line

Segundo o autor Pinheiro (2017a, posição 825), foi uma das primeiras tecnologias de banda larga a ganhar escala e uma das mais utilizadas no mundo. A principal razão de sua grande utilização, e uma de suas principais vantagens, é a utilização da infraestrutura da rede legada de telefonia fixa. Apesar de ter um custo de implantação relativamente baixo quando comparada com outras tecnologias mais recentes que exigiriam o projeto de uma rede totalmente nova, essa tecnologia requer um número razoável de centrais de equipamentos para compensar as deficiências e distâncias envolvidas na rede fixa. (Figura 1)

2.1.2 Modem a cabo (Cable modem)

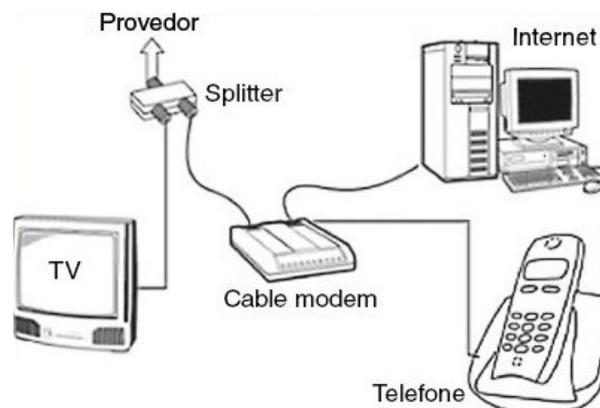
De acordo com Pinheiro (2017b, posição 825), a tecnologia de modem a cabo também está incluída entre as primeiras adaptadas para os serviços de banda larga. Utiliza as redes de transmissão de TV por assinatura através de canais físicos (cabos metálicos e coaxiais) entre o provedor do serviço e a residência do usuário. A estrutura de rede de cabos coaxiais serve como meio por onde o sinal trafega até ser decodificado por um modem na ponta do processo. Por esse motivo, a tecnologia é mais conhecida como cable modem. (Figura 2)

Figura 1 – Exemplo de conexão DSL.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Figura 2 – Exemplo de conexão cable modem.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

2.1.3 PLC – Power line communication

Conforme Pinheiro (2017c, posição 841), a tecnologia PLC (*Power line communication*), também conhecida como BLP (*Broadband over powerline*) ou banda larga sobre a rede elétrica, é uma tecnologia baseada no conceito de aproveitamento da rede elétrica para transmitir sinais de dados e voz, permitindo ainda aplicações como telefonia IP (VoIP), TV por assinatura, transmissão de vídeo e áudio sob demanda, telemetria e outras, atingindo velocidades de dezenas de megabits por segundo. (Figura 3)

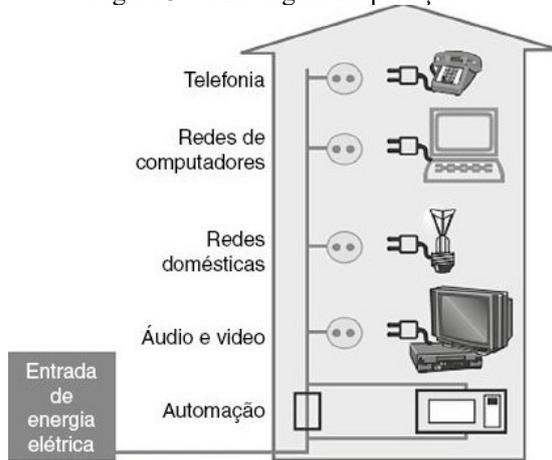
2.1.4 Wireless

Segundo o autor Pinheiro (2017d, posição 855), a maioria das conexões de banda larga sem fio (*wireless*) se dá por sinais de radiofrequência. Os sistemas funcionam mediante a instalação de antenas repetidoras em pontos estratégicos, que devem propiciar a cobertura até o aparelho do usuário final. Podemos agrupar as formas de conexão em dois segmentos: a conexão em frequências licenciadas e a conexão em frequências não licenciadas. (Figura 4)

De acordo Pinheiro (2017e, posição 855), a primeira forma opera em faixas específicas de frequências previamente estipuladas pelo órgão regulador de telecomunicações, a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações), no caso do Brasil. A segunda diz respeito à transmissão de sinais que utilizam faixas livres do espectro de radiofrequência, que não requerem licenciamento prévio, conhecidas como bandas ISM (*Instrumentation, Scientific and Medical*), que compreendem três segmentos do espectro: 902 MHz a 928 MHz, 2.400 MHz a 2.483,5 MHz e 5.725 MHz a 5.850 MHz; e a banda U-NII (*Unlicensed National*

Information Infrastructure), que contém as faixas de frequências entre 5.150 MHz e 5.825 MHz.

Figura 3 – PLC algumas aplicações.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Figura 4 – Conexões wireless.



Fonte: 4INFRA, 2020.

2.1.5 Móveis 3G, 4G e 5G

Conforme Pinheiro (2017f, posição 868), estas tecnologias de rede também utilizam o espectro de radiofrequência, especificamente as faixas destinadas à telefonia celular. As denominações 3G e 4G significam “terceira geração” “quarta geração”, respectivamente; isto é, após a primeira e a segunda geração, que marcaram as fases iniciais de telefonia móvel, a inovação das tecnologias celulares possibilitou a entrada das operadoras de telefonia nos serviços de banda larga.

Segundo o autor Pinheiro (2017g, posição 868), a principal característica do serviço móvel celular é oferecer uma cobertura onipresente e contínua, logicamente dependendo da infraestrutura instalada por operadora. Cada estação pode oferecer suporte a um número limitado de usuários na sua área de cobertura, até alguns quilômetros de distância. As torres de celulares são ligadas umas às outras por uma rede de *Backhaul* que também fornece ao usuário interligação com a rede fixa de telefonia, serviços de dados e internet.

De acordo com o IPEA (2021), o 5G é primeiramente a evolução natural das redes *Long Term Evolution* (LTE), mais comumente conhecido como 4G. A cada novo padrão, a eficiência espectral aumenta, sendo possível transmitir cada vez mais dados, possibilitando a introdução de novos serviços. A tecnologia móvel invade outros domínios, oferecendo, em certas circunstâncias, competição à telefonia e à banda larga fixa ou mudando a forma como

os negócios existentes operam. A introdução de novos padrões vem sempre acompanhada de enormes expectativas. Dizia-se, na época do lançamento do 3G, que teríamos enfim a internet móvel. Muitas operadoras na ocasião venderam seus serviços, também no Brasil. Planos de dados móveis eram vendidos como os planos de banda larga fixa, ou seja, pelas velocidades. A expectativa foi tão grande na época que tivemos a primeira bolha da telefonia móvel, elevando em muito o custo de aquisição das frequências. Os equipamentos, celulares e serviços não conseguiram de fato suprir as expectativas e praticamente somente no fim daquela década o padrão foi abraçado pelos usuários. (Figura 5)

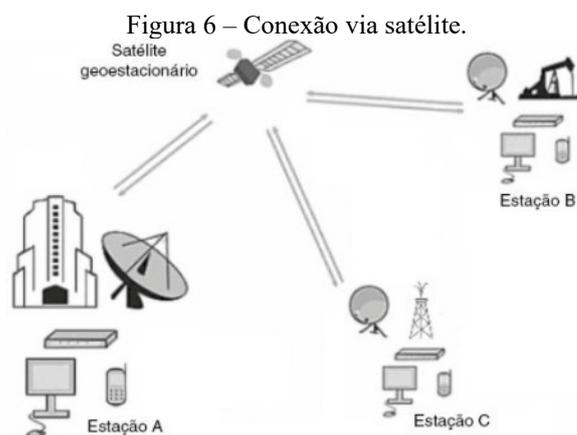
2.1.6 Satélite

De acordo com Pinheiro (2017h, posição 884), trata-se de um serviço em banda larga sem fio que também se dá por espectro eletromagnético, porém utilizando a triangulação entre satélites geostacionários (no espaço) e receptores (na terra). A conexão via satélite é uma opção para usuários localizados em áreas remotas, rurais ou montanhosas, onde não há infraestrutura física de acesso à rede de telecomunicações. Também permite o serviço remoto a navios, trens, veículos e outros meios de transporte. (Figura 6)

Figura 5 – Comparação 3G, 4G e 5G.

2001	2012	2020
3G	4G	5G
		
2000 kbps	10000 kbps	1000000 kbps (1GB/s)
Internet	Video	Internet das coisas

Fonte: OFICINA DA NET, 2019.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

2.1.7 Fibras ópticas

Conforme Pinheiro (2017i, posição 898), as redes de comunicação com fibras ópticas oferecem maiores velocidades, melhor largura de banda, confiabilidade e segurança no tráfego das informações. Como a tecnologia aplicada na construção das redes ópticas tem apresentado grande evolução ao longo dos anos, obtêm-se como resultado, infraestruturas com custos reduzidos e com maior nível de eficiência. Entretanto, fatores como custos de uso do solo e posteamento, assim como custos dos projetos e das respectivas licenças em áreas urbanas e rurais, ainda são limitantes na sua utilização.

Segundo o autor Pinheiro (2017j, posição 913), os projetos de fibras ópticas se aplicam nas redes externas principalmente para utilização pelas concessionárias de serviços de telecomunicações, operadoras de TV a cabo (CATV) e provedores de serviços de internet (ISPs). A fibra óptica também pode ser utilizada em ambientes sujeitos a ruídos eletromagnéticos (galpões industriais, subestações de energia elétrica, entre outros) ou com restrições para o meio metálico (depósitos de combustíveis e gases inflamáveis, oleodutos, gasodutos etc.), bem como atender distâncias superiores aos padrões exigidos para o cabeamento metálico.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

2.2 Terminologias de rede

2.2.1 CO – Central office

De acordo com Pinheiro (2017k, posição 3719), a central de equipamentos – *Head End* ou *Central Office* (CO) – é a infraestrutura na qual ficam instalados os equipamentos da PON (Rede Óptica Passiva): o OLT, para a transmissão dos sinais no meio óptico e o Distribuidor Geral Óptico (DGO), responsável pela interface entre os equipamentos de transmissão e os cabos ópticos da rede backbone.

2.2.2 Rede de longa distância

Conforme Weik (2000) uma rede de comunicações que lida com o tráfego de comunicações em longas distâncias físicas, como o tráfego nacional ou mundial é caracterizada por troncos de longa distância, como troncos entre vilas e cidades, troncos de grande porte centros de comutação e escritórios centrais (Cos), equipamentos de alta qualidade para alta-fidelidade e alta definição analógica (voz) e transmissão digital de dados, redes digitais (dados) de serviços integrados (ISDN), elevada capacidade de tráfego, comutação automática para tratamento de chamadas e mensagens sem assistência de operador, e serviço de Internet.

2.2.3 Rede feeder

A rede de alimentação é formada principalmente por enlaces ópticos que transportam os sinais oriundos do OLT, localizado na CO, aos pontos de subdivisão. Podem ser instalados em rede aérea ou subterrânea. (EN.WIKIPEDIA, 2019).

2.2.4 Rede de distribuição óptica

Segundo Iperius (2020, p. 1), a solução ODN como parte integrante do sistema PON, fornece o meio óptico de transmissão para a conexão física das ONUs às OLTs compreendendo 20 km ou mais de alcance. Instalados internamente no ODN temos de fibra óptica, cabos de fibra, conectores além dos divisores ópticos passivos e componentes

auxiliares colaboram entre si. O ODN está segmentado especificamente cinco derivação sendo: fibra de alimentação, fibra de distribuição, ponto de distribuição óptica, fibra de queda e ponto de acesso óptico.

2.2.5 Backbone

O *backbone*, conhecido também como espinha dorsal, é por onde trafegam a massa de dados geradas pela população na internet em diferentes localidades, um sistema robusto de alto desempenho, interligando cidades, estados, países e continentes. (CANALTECH, 202?).

2.2.6 Backhaul

O *backhaul* é o responsável em fazer a interligação de um *backbone* a uma sub-rede, pode ser guiado ou não guiado.

2.2.7 POP – Ponto de presença

De acordo com Wikipedia (2019), o *Point of Presence*, ou PoP, é o local onde o ISP (*Internet Service Provider*) mantém o equipamento de telecomunicações necessário para permitir o acesso local dos seus clientes/utilizadores à Internet. Sendo um ponto de acesso à Internet, o *point of presence* é também uma localização física, na medida em que se situa num determinado espaço geográfico, escolhido pelo ISP em função da população envolvente. Os ISPs possuem geralmente vários POPs estrategicamente distribuídos pela área em que operam, para permitir uma ligação local a todos os clientes.

2.3 Conexões em redes ópticas fttx

Segundo o autor Pinheiro (2017L, posição 4570), a tecnologia FTTx envolve a introdução de fibra óptica nas redes de telecomunicações para a distribuição de serviços. A interligação entre o usuário e a rede de distribuição pode ser feita por meio de diferentes configurações físicas. Tais configurações podem ser divididas quanto à conexão em dois tipos básicos:

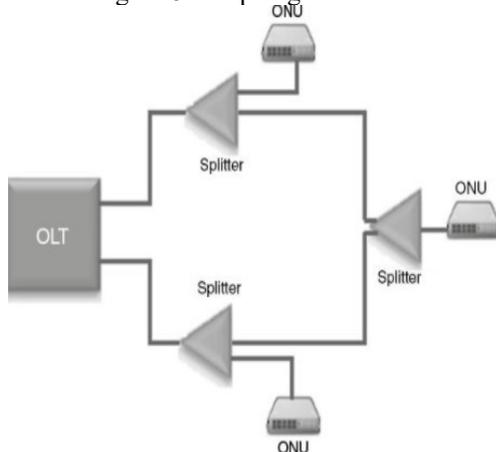
- **Ponto a Ponto:** cada fibra óptica é dedicada exclusivamente entre a central de equipamentos e um usuário específico.
- **Ponto a multiponto:** proporciona o compartilhamento de uma única fibra óptica entre a central de equipamentos e diferentes usuários.

Quanto à forma de conexão entre os elementos constituintes, podemos classificar as redes passivas em três topologias:

- **Topologia em anel** – As ONUs se interligam formando um barramento óptico, no qual as ONUs das extremidades são interligadas ao OLT. Cada ONU funciona como um derivador óptico ativo. A vantagem desta topologia é a redundância da rede no caso de falhas. (Figura 8).
- **Topologia em árvore** – As ONUs são conectadas a um OLT por um único derivador e o fator de derivação no derivador cria o número de subsegmentos para cada fibra óptica. Esta topologia é empregada quando as ONUs estão distantes do OLT ou estão agrupadas em uma mesma região. (Figura 9).
- **Topologia em barramento** – As ONUs são conectadas a um OLT por um segmento de fibra óptica que recebe vários derivadores passivos. A utilização desta topologia se aplica de forma contrária à topologia em árvore, já que entre o OLT e a última ONU existem outras ONUs com distâncias relativamente curtas entre uma e outra. (Figura 10).

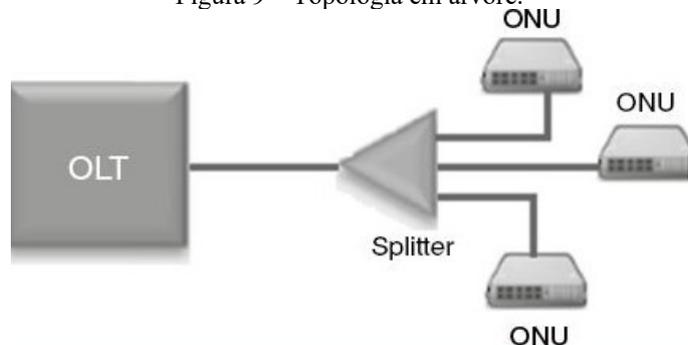
Convém ressaltar que uma rede PON pode utilizar topologias mistas, de acordo com a estratégia de implantação e de flexibilidade do projeto da rede.

Figura 8 – Topologia em anel.



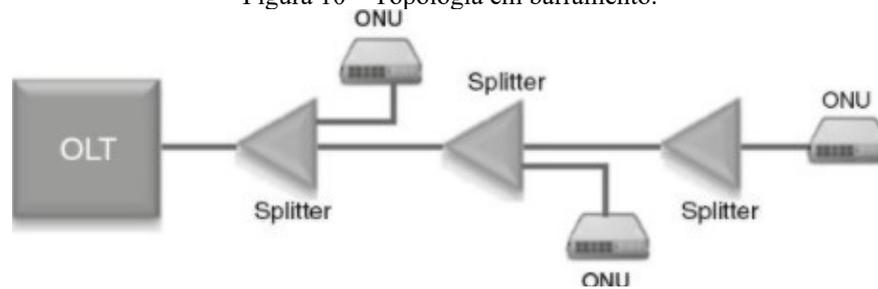
Fonte: PINHEIRO, 2017.

Figura 9 – Topologia em árvore.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Figura 10 – Topologia em barramento.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

2.4 Versões do fttx (Fiber to the x)

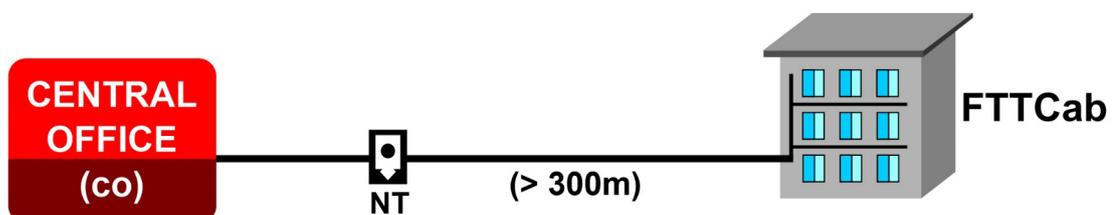
Em telecomunicações FTTx, ou fibra até o x, onde “x” representa um termo genérico para estabelecer algumas tecnologias de rede PON (rede óptica passiva), sua principal característica é fornecer ao cliente de modo geral fibra até certo ponto ou na última milha (*last mile*), onde pode ser usado no lance final cabo metálico, coaxial ou fibra.(FIBRACEM, 2019.)

2.4.1 FTTCab – Fiber to the cabinet

Segundo o autor Pinheiro (2017m, posição 4622), na modalidade de fibra até o armário (*Fiber to the cabinet – FTTCab*), temos o equipamento óptico (ONU) localizado em armário de distribuição intermediário externo, ou em pedestal junto ao passeio público, que se constitui no NT. Todos os equipamentos instalados devem apresentar uma construção robusta, tendo em vista as grandes variações de temperatura e climáticas às quais estarão sujeitos.

A partir do armário de distribuição é implementada uma rede que não é via fibra óptica, não podendo ultrapassar 300 m do ponto intermediário até o usuário final, podendo ser utilizado cabo metálico, par trançado e coaxial. (PINHEIRO, 2017n)

Figura 11 – Arquitetura FTTCab.

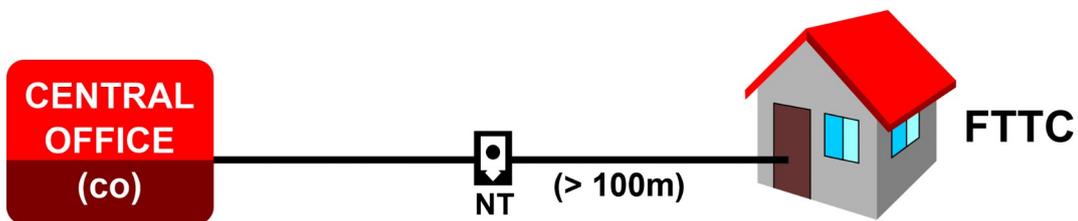


Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2021.

2.4.2 FTTC – Fiber to the curb

De acordo com Pinheiro (2017o, posição 4631), na modalidade de fibra até o meio-fio (*Fiber to the curb*), a fibra é terminada em armário ou caixa de distribuição intermediária, geralmente responsável pelo atendimento de uma pequena região (rua, conjunto de ruas e etc.), na área de um quarteirão. A partir deste ponto, a rede de acesso no sentido do usuário utiliza uma rede não óptica, normalmente tecnologia xDSL ou cabo coaxial.

Figura 12 – Arquitetura FTTC.



Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2021.

2.4.3 FTTP – Fiber to the premises

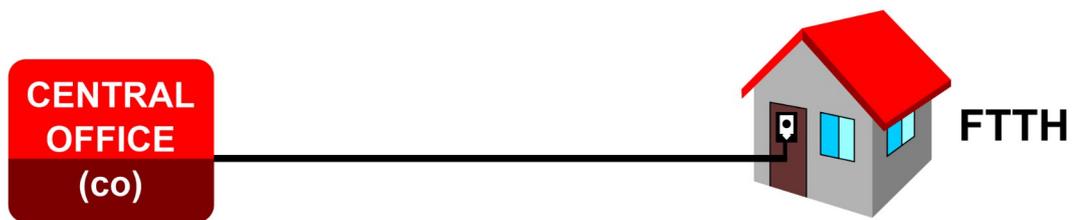
Conforme Pinheiro (2017p, posição 4631), na modalidade de fibra até as instalações (*Fiber to the Premises – FTTP*), a unidade óptica (ONT) é instalada no interior do ambiente do usuário, condição em que a rede de acesso está constituída totalmente por fibra óptica até a terminação da rede (NT). É possível distinguir quatro modalidades distintas para FTTP: a fibra até a residência (*Fiber to the Home – FTTH*), a fibra até o prédio (*Fiber to the Building – FTTB*), a fibra até o apartamento (*Fiber to the Apartment – FTTA*) e a fibra até o escritório (*Fiber to the Desk – FTTD*).

2.4.4 FTTH – Fiber to the home

Segundo o autor Pinheiro (2017q, posição 4644), na modalidade fibra até a residência (*Fiber to the Home – FTTH*), a fibra óptica é levada ao interior da residência do usuário, substituindo os cabos de cobre ou coaxiais. A rede óptica de distribuições termina numa caixa de terminação óptica (CTO) com suporte para adaptadores ópticos. Esta caixa é preparada para receber *splitters* ou conectores do cabo drop óptico que vai para o interior da residência

do usuário. Entre o cabo drop e a rede interna do usuário pode ser utilizado um bloqueio óptico interno (*Fiber Optic Block* – FOB) ou um ponto de terminação óptica de assinante (PTO ou PTA) para realizar a transição do drop óptico para o cabeamento interno no usuário. Essa transição ocorre através de conector óptico e um cordão óptico que estabelece a conexão com o ONT no usuário.

Figura 13 – Arquitetura FTTH.



Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2021.

2.4.5 FTTB – Fiber to the building

De acordo com Pinheiro (2017r, posição 4667), a modalidade de fibra até o edifício (*Fiber to the building* – FTTB) é ideal para atendimento de edifícios comerciais ou residenciais onde o cabeamento óptico tem origem na central da operadora e a fibra óptica chega até um ponto intermediário, existente na entrada da edificação (armário, *shaft*, sala de equipamentos etc.), atendendo a um condomínio residencial ou comercial, ou mesmo um prédio individual. A partir deste ponto de terminação, o acesso é individual e realizado, normalmente, por meio de uma rede utilizando tecnologia não óptica, em cabeamento estruturado.

Figura 14 – Arquitetura FTTB.

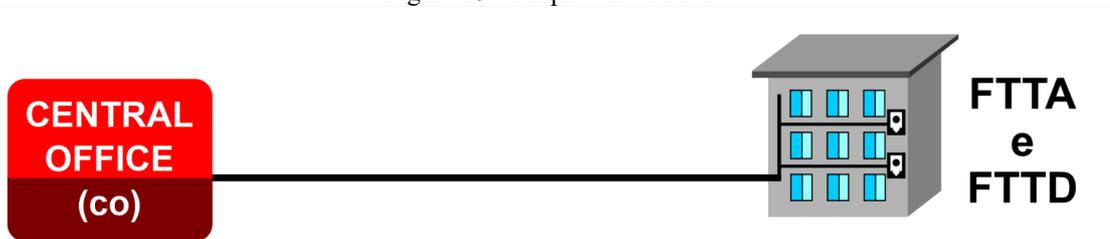


Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2021.

2.4.6 FTTA – Fiber to the apartment

Conforme Pinheiro (2017s, posição 4667), na modalidade fibra até o apartamento (*Fiber to the Apartment – FTTA*), a rede óptica passiva adentra o edifício comercial ou residencial chegando até uma sala de equipamentos. A partir deste ponto, o sinal passa por divisores ópticos passivos situados no interior da edificação, posteriormente, é encaminhado por cabos *drop*, através da prumada do prédio, para cada sala ou apartamento individualmente, ou seja, cada usuário será atendido por uma única exclusiva fibra óptica.

Figura 15 – Arquitetura FTTA.

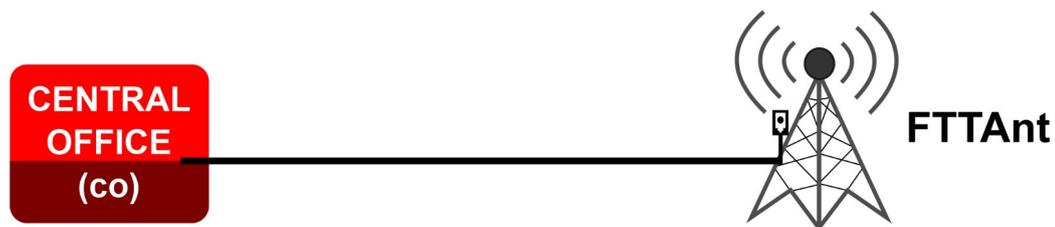


Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2021.

2.4.7 FTTAnt – Fiber to the antenna

Segundo o autor Pinheiro (2017t, posição 4688), na modalidade de fibra até a antena (*Fiber to the antenna – FTTAnt*), a fibra óptica é usada na comunicação de equipamentos situados em torres para telecomunicações. Isto é especialmente interessante para as novas tecnologias em redes celulares e sistemas de rádio micro-ondas que utilizam conexões em fibra óptica, além de cabos metálicos.

Figura 16 – Arquitetura FTTAnt.



Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2021.

2.4.8 FTDD – Fiber to the desk

De acordo com Pinheiro (2017u, posição 4688), na modalidade fibra até o escritório (*Fiber to the Desk – FTDD*), a rede óptica passiva é utilizada onde a demanda por banda de transmissão em aplicações de videoconferência, e mesmo de internet, exige uma capacidade adicional para as redes de comunicação. Trata-se de uma arquitetura usada, principalmente, nas redes locais de computadores (LAN) e que permite o uso da banda larga para a transmissão de dados, voz e imagem (*triple play*). (Figura 15)

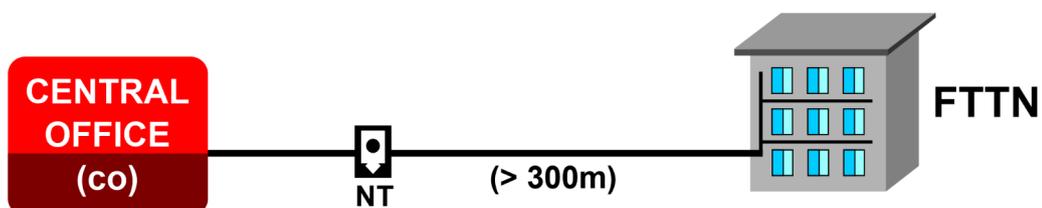
2.4.9 FTTF – Fiber to the feeder

Conforme Pinheiro (2017v, posição 4688), arquitetura de projeto e implantação de rede HFC (híbrida/fibra/coaxial) que considera em sua concepção a rede de fibra óptica levada até um ponto predefinido, agregando ainda uma rede de cabos coaxiais para conectar amplificadores e suportar o canal de retorno para atendimento aos usuários. Aplica-se a mesma filosofia da modalidade FTTN.

2.4.10 FTTN – Fiber to the neighborhood

Segundo o autor Pinheiro (2017w, posição 4709), na modalidade de fibra até a vizinhança (*Fiber to the neighborhood*), a rede óptica passiva que sai da central da operadora é conectada diretamente ao equipamento óptico (ONU) em armário externo intermediário, normalmente atendendo a um bairro e situado em distância superior a 300 m dos usuários finais. O sinal, a partir deste ponto, pode ser disponibilizado por meio de cabos coaxiais, cabos metálicos ou outros meios não ópticos.

Figura 17 – Arquitetura FTTN.



Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2021.

2.5 Tecnologias de múltiplo acesso

Há três métodos primordiais para implementar a Multiplexação: *Frequency Division Multiplexing* (FDM), *Time Division Multiplexing* (TDM) e *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). São técnicas para tirar um melhor aproveitamento dos meios de transmissão, sem fio e com fio, pois permite que em um mesmo meio sejam transmitidos diferentes frequências e comprimentos de onda.

De acordo com Pinheiro (2017x, posição 1532), o elemento básico de transmissão numa rede óptica é o comprimento de onda de luz. Como muitos comprimentos de onda são transportados pela rede, torna-se importante gerenciar e comutar cada comprimento de onda individualmente. Assim, no planejamento de redes ópticas, deve-se ter em mente a melhor utilização da rede, acompanhado dos requisitos de transparência, arquitetura adequada e protocolos de comunicação eficientes.

Conforme Pinheiro (2017y, posição 1532), o ponto chave no projeto de redes ópticas passivas está nas arquiteturas e protocolos que combinam simultaneamente, em uma única fibra, as transmissões de múltiplos feixes de luz, transportando múltiplos canais de dados. Isso pode ser obtido com a Multiplexação por Divisão do Comprimento de Onda (WDM), e suas variações, a Multiplexação Densa por Divisão de Comprimento de Onda (DWDM) e a Multiplexação Esparsa por Divisão de Comprimento de Onda (CWDM) ou WDM Esparso.

2.5.1 FDM – Multiplexação por divisão de frequência

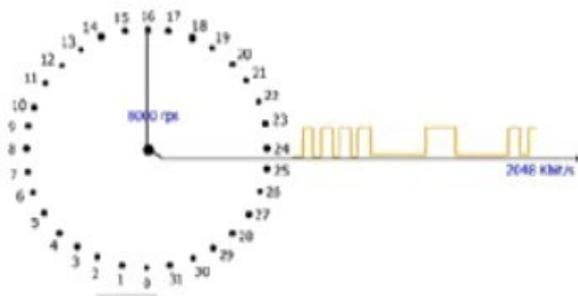
De acordo com Teleco (2007), Multiplexação por Divisão de Frequência ou *frequency division multiplex* (FDM), se assemelha ao TDM, o FDM é uma tecnologia que transmite múltiplos sinais simultaneamente sobre um único caminho de transmissão. Porém, esta técnica funciona através de modulação, que permite o deslocamento de um sinal no espectro de frequência.

2.5.2 TDMA – Acesso múltiplo por divisão no tempo

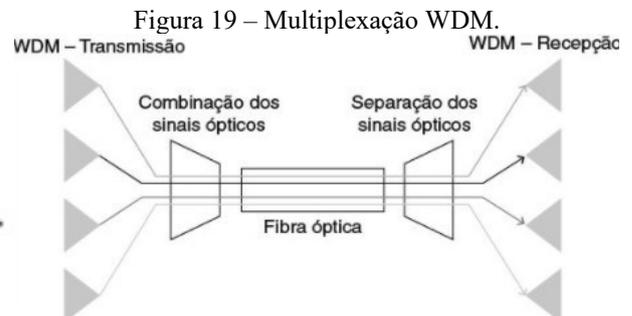
A tecnologia de acesso múltiplo por divisão no tempo (TDMA), consiste em dividir a largura de banda em um mesmo meio de transmissão em vários canais, o responsável por fazer essa distribuição nos canais em pequenos intervalos de tempo é conhecido como *time*

slot (Figura 18). Para que não haja conflito de pacotes no meio de transmissão, o TDMA permite que cada ONU use um *time slot* fixo ou variável, aproveitando toda a largura do canal ofertada. (TELECO, 2011).

Figura 18 – Time slot em TDMA.



Fonte: TELECO, 2007.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

2.5.3 WDM – Multiplexação por divisão do comprimento de onda

Segundo o autor Pinheiro (2017z, posição 1532), a Multiplexação por Divisão do Comprimento de Onda (WDM) é a técnica de transmitir vários “feixes de laser virtuais” simultaneamente, dentro de uma única fibra óptica. É uma técnica para a utilização de uma fibra (ou dispositivo óptico) para transportar diversos canais ópticos separados e independentes. Os sinais são transmitidos em diferentes comprimentos de onda e transportam a informação através de uma única fibra, com o objetivo de aumentar a capacidade de transmissão e, conseqüentemente, usar a largura de banda de maneira mais eficiente. (Figura 19).

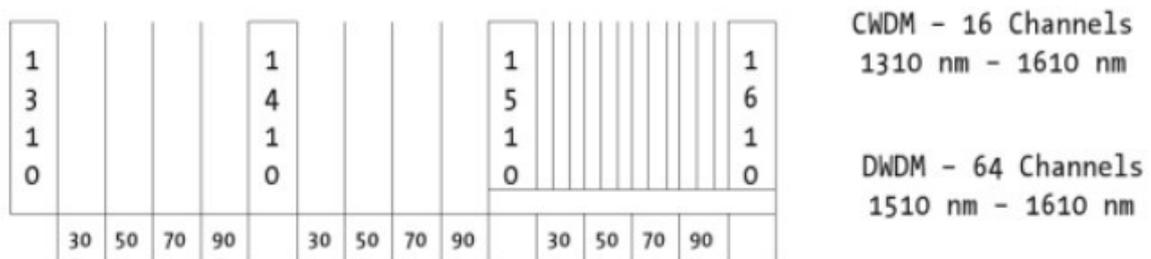
- a) *dwdm* – multiplexação por divisão de comprimento de onda densa;
 - de acordo Pinheiro (2017aa, posição 1557), com a técnica de transmissão de Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Densa (DWDM) emprega comprimentos de onda de luz para transportar dados em altíssima velocidade através da rede de telecomunicações. A DWDM combina múltiplos comprimentos de onda na mesma fibra (tipicamente, entre 40 ou 80 canais, entre 1.530 nm até 1.560 nm);
 - conforme Pinheiro (2017ab, posição 1557), com a DWDM, os provedores de serviço podem planejar o crescimento de largura de banda conforme o aumento das necessidades, de forma bastante flexível, além de permitir o crescimento em partes de uma rede onde, porventura, estejam ocorrendo problemas de congestionamento. Com a DWDM, em vez de utilizar uma

fibra física, torna-se possível utilizar “fibras virtuais” nas quais comprimentos de onda diferentes podem trafegar na mesma fibra física.

b) cwdm – coarse wavelength division multiplexing;

– Segundo o autor Pinheiro (2017ac, posição 1575), o desenvolvimento da CWDM, tecnologia derivada da DWDM, respondeu à demanda crescente da rede de fibra óptica em redes de menor área de cobertura. Com uma capacidade menor que o DWDM, a CWDM permite que um número menor de comprimento de onda, tipicamente 8 ou menos (1.470 nm, 1.490 nm, 1.510 nm, 1.530 nm, 1.550 nm, 1.570 nm, 1.590 nm, 1.610 nm), seja transmitido pela mesma fibra óptica, barateando o projeto dos sistemas.

Figura 20 – Comparação entre CWDM e DWDM.



Fonte: SOUSA, 2013.

c) wwdm – wide wavelength division multiplexing;

– de acordo com o site da UFRJ (2017a, p.1) O WWDM (*Wide Wavelength Division Multiplexing*) utiliza a janela óptica em 1310 nm e possui um amplo espaçamento entre os canais multiplexados. O WWDM permite a combinação de 4 comprimentos de onda em uma única fibra. Além disso, é uma tecnologia muito versátil, pois suporta fibras multimodo para distâncias curtas (300 m) e fibras monomodo para longas distâncias (10 km);

– conforme o site da UFRJ (2017b, p.1) O *Wide WDM* é amplamente aplicado a LAN's (*Local Area Networks* – redes locais). Além disso, é utilizado nas especificações 10GBase-LX4/LW4 do protocolo 10 GE (10 *Gigabit Ethernet*), aprovado em março de 2001 pelo comitê IEEE 802.3. Nestas especificações se usam duas fibras monomodos ou multimodos com WWDM, no comprimento de onda de 1310 nm. Neste caso, são multiplexados quatro comprimentos de onda em cada fibra, espaçados de 24.5 nm.

- d) udwdm – ultra dense wavelength division multiplexing;
- segundo o site da UFRJ (201?c, p.1), o U-DWDM (*Ultra – Dense Wavelength Division Multiplexing*) é considerado como o próximo estágio nas comunicações ópticas. Esta tecnologia combina 128 ou 256 comprimentos de onda em uma única fibra óptica, sendo que cada comprimento de onda teria uma taxa de transmissão de 2.5 Gb/s, 10 Gb/s e até 40 Gb/s. No U-DWDM os canais estão espaçados de 10 GHz, o que corresponde a 0.08 nm;
 - de acordo com o site da UFRJ (201?d, p.1) Nos Laboratórios Bell, em Holmdel, New Jersey, conseguiu-se atingir uma transmissão de 1022 comprimentos de onda em uma única fibra óptica, utilizando-se U-DWDM. Nessa transmissão experimental, cada comprimento de onda carregava informações distintas. Foi utilizado um único laser de alta velocidade para gerar todos os sinais, em vez de usar um laser para cada comprimento de onda, como é feito nos sistemas WDM convencionais. Cada canal carrega informações a uma taxa de 37 Mb/s, totalizando mais de 37 Gb/s. Pesquisadores acreditam que esta taxa pode chegar a uma ordem de Tb/s.

2.6 MPLS – Multi-protocol label switching

De acordo com Teleco (2013, p. 1), o MPLS (*Multi-Protocol Label Switching*) definido pela RFC 3031 é uma tecnologia de encaminhamento de pacotes baseada em rótulos ou *labels*, que atua entre as camadas 2 e 3 do modelo OSI, citado também por alguns autores como um protocolo de camada 2,5. Amplamente difundida em países de primeiro mundo e com atuação expressiva em boa parte dos países em desenvolvimento, a tecnologia vem se consolidando devido à capacidade de associar a facilidade dos roteadores com a eficiência dos *switchs*.

2.6.1 MPLS sobre wdm

Conforme Gouveia et al., (2003a, p.1), as redes MPLS sobre WDM (e IP sobre WDM) estão ganhando atenção significativa devido à eficiência na utilização de recurso que pode ser alcançada considerando em conjunto as duas camadas de rede. Essas redes são configuradas definindo caminhos de luz na camada óptica e LSPs (*Label Switched Path*) na camada de pacotes. Os *Lightpaths* (rotas que terminam nos LSRs) são roteados pela rede física (compreendendo OXCs conectados por meio de fibras ópticas) e os LSPs são roteados sobre a

topologia lógica de *lightpaths* (o virtual rede óptica). Além dos OXCs (*Optical Cross-Connects*), que fornecem recursos de comutação de comprimento de onda, alguns nós também podem incluir recursos de comutação de pacotes, ou seja, alguns OXCs podem ter LSRs (*label switched routers*) co-localizados (esses nós às vezes são chamados LSRs generalizados).

Segundo Gouveia et al., (2003b, p.1), OXCs com LSRs co-localizados podem alternar as demandas de tráfego entre os *lightpaths*, permitindo maior compartilhamento de recursos (ou seja, ter a demanda de tráfego acomodados em um número menor de caminhos de luz). Na verdade, ter todos os sites OXC com LSRs co-localizados maximizaria os ganhos de compartilhamento de recursos, mas isso poderia levar a desnecessariamente altos custos de rede.

2.7 Aon – Rede óptica ativa

A AON (Rede óptica ativa – *Active optical network*), ao contrário da rede PON, a AON necessita de equipamentos ativos de rede para seu funcionamento em sua ODN, ou seja, equipamentos que precisam de fornecimento elétrico para o seu funcionamento e distribuição de sinais ópticos. Os tipos de topologias que podem ser implementadas por esta rede de acesso são: ponto a ponto e ponto a multiponto. (LOPES, 2011 Apud FILHO, 2018).

2.8 Tecnologias de rede pon

De acordo com Muller (2020, p. 2), a transmissão dos sinais ópticos na rede PON é feita por meio de OLT (*Optical Line Terminal*), que os redireciona através de fibra óptica até os *splitters*, os divisores ópticos passivos. Os terminais de usuários (ONUs – *Optical Network Unit*) integram os dados de áudio, vídeo, sistema de segurança, sistema de automação, que são transmitidos em uma única rede óptica passiva. As tecnologias de rede PON mais conhecidas e mais usuais em projetos de tráfego de dados são a EPON e a GPON. Ambas utilizam a arquitetura FTTx (*Fiber to the x* – Fibra até o x). O “x” pode ser FTTH (*Fiber to the home*).

2.8.1 Apon – Rede óptica passiva sobre modo de transferência assíncrona

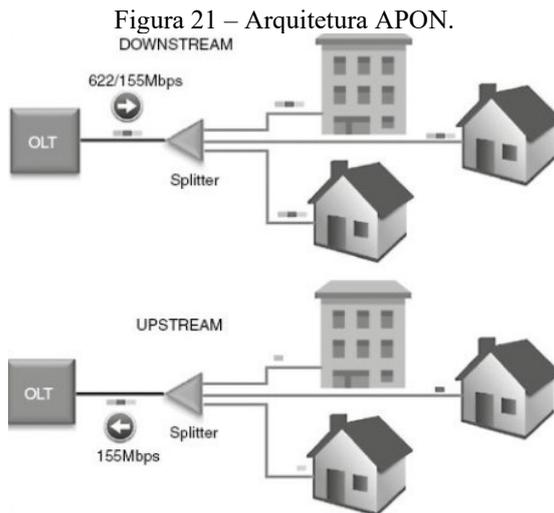
De acordo com Pinheiro (2017ad, posição 4162), até a década de 1990, as primeiras redes ópticas passivas foram desenvolvidas utilizando os conceitos de multiplexação no tempo (*Time Division Multiplexing* – TDM), porém as taxas de transmissão utilizadas para atender os serviços de telefonia na época não eram as ideais para o transporte de dados. A primeira geração de redes PON foi designada por APON, em 1995, quando o FSAN padronizou a rede óptica passiva em modo de transferência assíncrona (*Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network* – APON), padrão aceito pela União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union* – *Telecommunication Standardization Sector*, ou ITU-T) como norma ITU-T G.983.

Conforme Pinheiro (2017ae, posição 4162), nessas redes, a conectividade é garantida usando o modo ATM, ou seja, o fluxo de informação é segmentado em células, as quais são entregues à ONU apropriada de acordo com seu endereço de destino contido no cabeçalho da célula. A comunicação de *upstream* requer a utilização de um protocolo de acesso ao meio apropriado para ultrapassar a limitação associada ao fato de o meio ser compartilhado. No formato APON, padronizado pelo FSAN e aceito pelo ITU-I, a transmissão de pacotes ocorre em tamanhos fixos de 53 *bytes* por pacote. Este formato foi aplicado para atendimento de usuários utilizando fibra óptica monomodo com distâncias limitadas a 20 km, número máximo de 32 ONTs, com taxas de transmissão derivadas do ATM de 155 Mbps e 622 Mbps no sentido *downstream* (em tráfego contínuo de dados *broadcast*), com transmissão em TDM, e 155 Mbps no sentido *upstream* (tráfego em rajadas), com transmissão em TDMA (*Time Division Multiple Access*). (Figura 21)

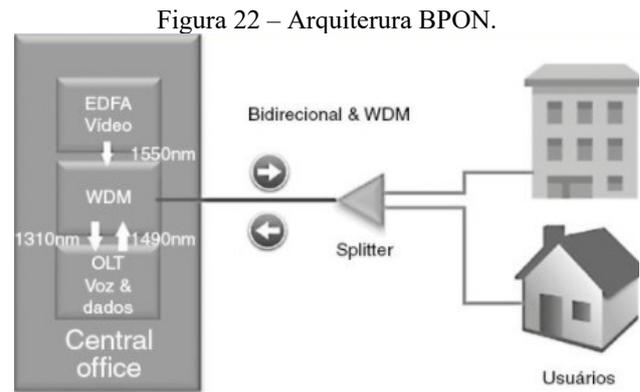
2.8.2 Bpon – Rede óptica passiva banda larga

Segundo o autor Pinheiro (2017af, posição 4177), o termo APON levou muitos provedores a acreditarem que apenas os serviços de ATM pudessem ser utilizados para os usuários finais. Em função disso, a FSAN decidiu modificar o nome para *Broadband PON*, ou BPON, e introduziu outras pequenas mudanças no padrão. Em 1998 foi editada a norma ITU-T G.983.1 para taxas de 155 Mbps simétrico (canal de *upstream*) e 622 Mbps e 155 Mbps assimétrico (canal de *downstream*); posteriormente, o ITU aprovou a norma ITU-I G.983.3, na qual a capacidade de enlace foi estendida para 622 Mbps simétrico (canal de *upstream*) e

1.244 Mbps e 622 Mbps assimétrico (canal de *downstream*) para BPON, permitindo serviços como o suporte ao WDM, integração de dados, voz, serviços de vídeos, alocação dinâmica da largura de banda e qualidade de serviço, com garantia de interoperabilidade dos diferentes equipamentos. (Figura 22)



Fonte: PINHEIRO, 2017.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

2.8.3 Epon – Rede óptica passiva ethernet

De acordo com Keiser 2006 (apud Melo; Nunes 2011, p. 43) o Epon surgiu da ideia que a tecnologia Apon era imprópria para uso devido a sua falta de capacidade de transmissão de vídeo, banda insuficiente, complexidade e custo. O rápido desenvolvimento do *Ethernet* fez as taxas de transmissão alcançarem os Gbit/s e a conversão entre os protocolos ATM para IP, foram necessárias. As principais soluções de atendimento, para as quais se aplica o EPON, são: FTTB, FTTC tendo por objetivo em longo prazo a substituição para FTTH para entrega de serviços de dados, voz e vídeo em cima de uma única plataforma com largura de banda maior que o APON.

Atualmente a tecnologia Epon tem uma performance de tráfego simétrica de 1,25 Gbps para *download* e *upload*, trabalha com um comprimento de onda de 1490 nm para *down* e 1310 para *up*. As portas PON das OLTs Epon suportam até 64 ONTs ou ONUs, vale ressaltar que ela não é o que se tem de melhor no mercado em relação a banda de dados e escalabilidade, mas é bastante usada devido ao preço dos ativos de rede dela ser mais

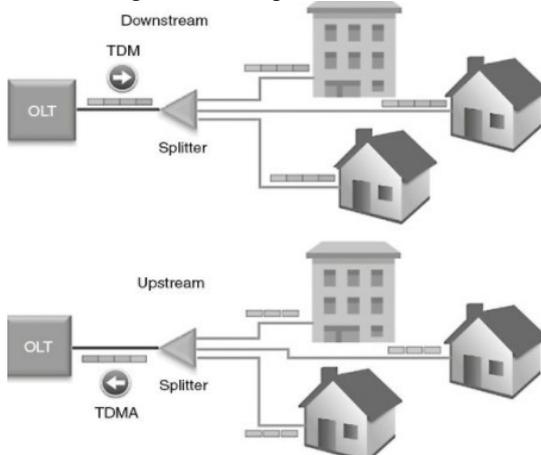
acessíveis, preferida pelos provedores de pequeno porte que estão começando no mundo FTTH. (INTELBRAS, 2018a). (Figura 24)

2.8.4 Gpon – Rede óptica passiva gigabit

Conforme Oliveira 2010 (apud Melo; Nunes 2011, p. 44), a Rede Óptica Passiva Gigabit tem por capacidade transmitir maiores velocidades de banda nas redes de acesso. Surgiu para superar o Bpon e Epon, com a ideia principal de transmitir comprimentos de pacotes variáveis a taxa de gigabit por segundo, para isso o grupo FSN reuniu esforços e em abril de 2001 começou a desenvolver novas padronizações, sendo posteriormente aprovadas e publicadas pela ITU-T na série de recomendações para aplicação de um Gpon, sendo os padrões G984.1 a G984.4, publicados no primeiro semestre de 2008. O tráfego de informações *downstream* é transmitido em modo *broadcast*, ou seja, a informação é transmitida a todos os elementos da rede. A mesma informação chega a todos os usuários, por isso é necessário se utilizar um sistema de criptografia das informações para manter a privacidade na comunicação.

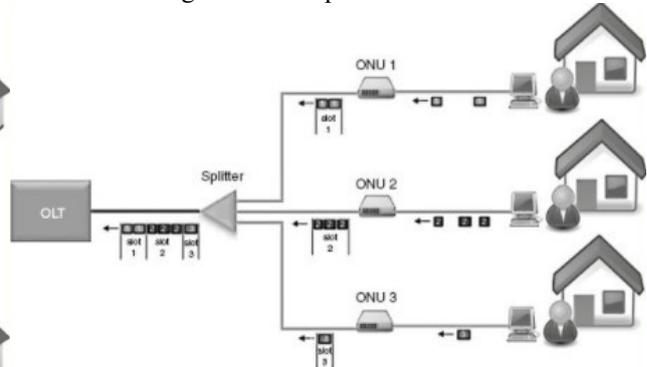
Na tecnologia Gpon, diferentemente da Epon, a capacidade de tráfego é chamada de assimétrica devido a taxa de *download* ser de 2,5Gbps e no *upload* 1,5 Gbps. As portas PON das OLTs Gpon suportam até 128 ONTs ou ONUs e trabalham no mesmo comprimento de onda da Epon. Essa tecnologia é mais aplicada em ISPs de médio porte para cima, devido seus ativos de redes serem mais caros em relação a Epon. (INTELBRAS, 2018b). (Figura 23)

Figura 23 – Arquitetura GPON.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Figura 24 – Arquitetura EPON.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

2.9 Próximas gerações de rede pon

Segundo o autor Pinheiro (2017ag, posição 4295), o rápido crescimento do tráfego da Internet, impulsionado principalmente pelos novos serviços multimídias em banda larga, exige redes de acesso capazes de lidar com maiores taxas de dados e oferecer melhor qualidade nos serviços agregados. Por contarem com essas características, as redes de acesso ópticas passivas estão cada vez mais presentes nas topologias de acesso, permitindo alta capacidade de transmissão, escalabilidade, transparência e novas facilidades de configuração e gerenciamento.

De acordo com o autor Pinheiro (2017ah, posição 4358), as chamadas PON de próxima geração, ou *netx-gen* PON, demonstram uma tendência para a transmissão com largura de banda agregada em 40 Gbps, ou superior, e incluem serviços de gerenciamento de banda e facilidade no uso múltiplo de banda larga, transporte de informação ao longo da rede com controle de qualidade de serviço (*Quality of Service – QoS*), sendo que as funções de gerência tramitam junto com rede, independentes do tráfego de dados. Os diversos serviços podem ser providos aos usuários com total mobilidade, sem qualquer restrição e com a garantia de estarem disponíveis onde necessário. A utilização da comunicação de dados, voz e vídeo (*triple play*) em um mesmo canal é um ponto de evolução proposto como conceito para essas novas redes.

Conforme Pinheiro (2017ai, posição 4358), entretanto, uma questão fundamental para o desenvolvimento de PONs de próximas gerações capazes de suportar taxas elevadas de divisão está no nível de multiplexação exigido para lidar com todos os fluxos de dados das conexões individuais transportados pelo enlace óptico. Essas redes incluem novos desenvolvimentos, utilizando diferentes técnicas de multiplexação dos sinais ópticos.

2.9.1 Xg-pon1

Segundo o autor Pinheiro (2017aj, posição 4358), a arquitetura XG-PON1, parte integrante das tecnologias definidas como NG-PON1, fornece velocidades assimétricas de 10 Gbps, no sentido de *downstream*, e 2,5 Gbps, no sentido de *upstream*, conforme descrito no padrão ITU G.987, ratificado em 2010. Herdou a formatação de quadros e a camada de controle da GPON, disponibilizando novos tipos de serviços com maiores taxas de transmissão e com grau de divisão superior. Isso adicionou maiores funcionalidades e maiores

taxas de transmissão para as redes de acesso óptico, sem aumentar a complexidade dos protocolos.

De acordo com o autor Pinheiro (2017ak, posição 4376), por exemplo, para que as arquiteturas GPON e XG-PON coexistam na mesma rede, é necessária a adição de um acoplador óptico localizado na estação central. Este componente foi especificado como WDM1r na recomendação ITU G.984.5. O FSAN selecionou os comprimentos de onda para *downstream* de 1.575 nm a 1.580 nm e, para *upstream*, de 1.260 nm a 1.280 nm. Com a adição do combinador WDM1r, uma perda foi adicionada ao orçamento de potência, resultando em valores na ordem de 29 dB. Além disso, XG-PON1 especifica 31 dB, 33 dB e 35 dB como orçamentos de potência óptica opcionais.

Conforme Pinheiro (2017al, posição 4376), um problema para a adoção da GPON e XG-PON1 na mesma infraestrutura de rede é a existência (ou melhor, a inexistência) de filtros de bloqueio dos comprimentos de ondas nos ONTs instalados no usuário. ONTs GPON apresentam um filtro integrado para eliminar a interferência de comprimentos de onda XG-PON1. No entanto, alguns ONTs mais antigos podem não ter este filtro e os provedores necessitarão instalar filtros externos juntos aos ONTs para garantir a coexistência das tecnologias.

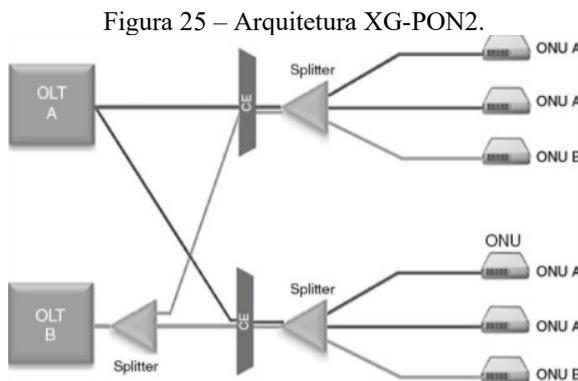
2.9.2 Xg-pon2

Segundo o autor Pinheiro (2017am, posição 4375), a arquitetura XG-PON2 visa aumentar a capacidade das PONs para 40 Gbps, no sentido de *downstream* e 10 Gbps, no sentido de *upstream*. Neste caso, múltiplos sistemas de XG-PON1 operam em diferentes comprimentos de ondas, em esquema DWDM, para que possam ser “empilhados” na mesma fibra física. A tecnologia é baseada na rede óptica de distribuição (ODN) transparente, a fim de coexistir com GPON e XG-PON1, podendo suportar até 80 Gbps (8 comprimentos de onda) x 10 Gbps (capacidade por comprimento de onda).

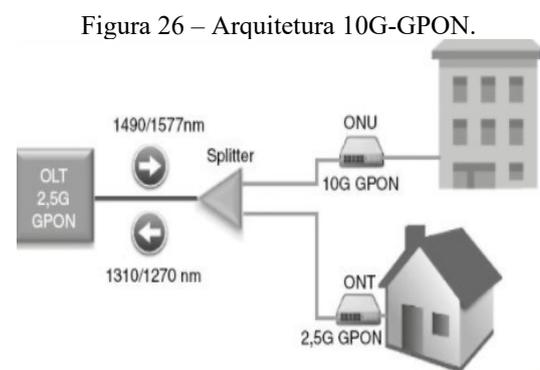
De acordo com o autor Pinheiro (2017an posição 4375.), a XG-PON2 permite aos provedores de serviços colocarem diferentes tecnologias de redes ópticas passivas na mesma rede de distribuição. A coexistência é assegurada por um elemento passivo, o chamado elemento de coexistência (CE), que combina e/ou divide os diversos comprimentos de onda associados com cada uma das tecnologias. (Figura 25)

2.9.3 10G-Gpon – 10 Gigabit passive optical network

Conforme Pinheiro (2017ao, posição 4394), a arquitetura 10G-GPON faz parte das tecnologias XG-PON1 e teve seu padrão ratificado pelo ITU-T, em junho de 2010. O modelo segue a especificação ITU-G.987, com taxas de transferências de 2,5 Gbps e 10 Gbps com comprimentos de onda de 1.490 nm e 1.577 nm, no sentido *downstream*, e 1.310 nm (2,5 Gbps) e 1.270 nm (10 Gbps), no sentido de *upstream*. (Figura 26)



Fonte: PINHEIRO, 2017.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

2.9.4 10G-Epon gigabit – Ethernet passive optical network

Segundo o autor Pinheiro (2017ap, posição 4394), a arquitetura 10G-EPON, ratificada em setembro de 2009, segue a especificação IEEE 802.3av. Foi desenvolvida com o objetivo de manter a compatibilidade com o modelo EPON existente. Para garantir esta compatibilidade, é usado um comprimento de onda de luz no sentido de *downstream* acima do utilizado para vídeo, de modo que o sinal possa ser recebido pelas ONUs sem que seja necessário substituir os dispositivos dos usuários.

De acordo com o autor Pinheiro (2017aq, posição 4407), no sentido de *upstream*, a multiplexação TDM garante a coexistência entre EPON e o modelo 10 G-PON, ou seja, todas as ONUs se comunicam simultaneamente e o OLT executa a comutação do sinal para o equipamento apropriado. Esse modelo de PON pode ser implementado em modo simétrico (10 Gbps para *downstream* e *upstream*). O gerenciamento da rede óptica é feito por meio do protocolo MPCP, são características da arquitetura:

- **Sentido de *downstream* de dados:** comprimento de onda 1.490 nm para curtas distâncias e 1.577 nm para longas distâncias, com taxa de transferência de 10 Gbps.

- **Sentido de *upstream* de dados:** comprimento de onda de 1.310 nm taxa de transferência de 1 Gbps ou 10 Gbps. (Figura 28)

2.9.5 Wdm-pon – Wavelength division multiplexing passive optical network

Conforme Pinheiro (2017ar, posição 4407), na arquitetura *Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network* (WDM-PON), padronizada pelas normas G.694.1 (DWDM) e G.694.2 (CWDM) do ITU-T, cada terminal óptico recebe um canal separado com comprimento de onda passivo no local de divisão da PON. Essa transmissão paralela da informação em diferentes comprimentos de onda permite uma melhor ocupação das fibras existentes e, neste caso, a capacidade de rede de alimentação da PON é compartilhada com maior segurança por mais usuários.

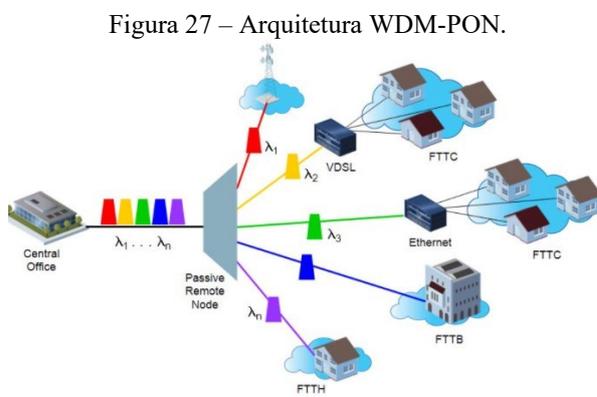
Segundo o autor Pinheiro (2017as, posição 4427), a técnica WDM permite que vários canais TDM sejam multiplexados em uma única fibra, aumentando a capacidade de transmissão do sistema. A topologia lógica da rede é ponto a ponto e reúne múltiplos comprimentos de onda, tanto no sentido de *downstream* como no sentido de *upstream*. Tecnicamente, o WDM-PON pode ser implementado em duas versões básicas:

- Com a subdivisão de toda a potência óptica, como ocorre na PON tradicional.
- Através da subdivisão pela seleção dos comprimentos de onda individuais.

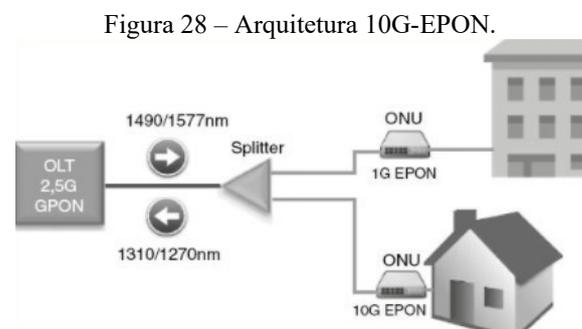
De acordo com o autor Pinheiro (2017at, posição 4427), isto significa reunir na mesma fibra vários comprimentos de onda diferentes, cada um gerado por uma fonte distinta. Na primeira versão, a potência óptica é subdividida para todas as ONU/ONTs e cada um recebe um comprimento de onda específico. Na segunda versão, existe um filtro óptico (chamado *Arrayed Waveguide Grating* – AWG) na entrada, sendo que a luz é separada pelo seu espectro e novamente reunida em outro estágio. No transmissor, múltiplos comprimentos de onda de luz são misturados e enviados. No receptor, os sinais são novamente separados e cada ONU possui um comprimento de onda reservado para se comunicar com o OLT. As redes WDM-PON utilizam comprimentos de onda de 1.500 nm, no sentido de *downstream*, e 1.310 nm, no sentido de *upstream*. Em cada janela, a separação dos comprimentos de onda se dá por WDM denso (tipicamente, de 100 GHz).

Conforme Pinheiro (2017au, posição 4427), WDM-PON permite que diferentes ONUs possam operar em diferentes taxas de bits. Logo, diferentes serviços podem ser oferecidos em uma mesma rede. A arquitetura pode seguir duas estruturas: *broadcast* ou AWG. Em

broadcast, o OLT transmite todos os comprimentos de onda na fibra óptica e, pelos *splitters*, todas as ONUs recebem o sinal, mas fazem uma filtragem para processar apenas a frequência destinada a ela. No AWG, um roteador é responsável pelo roteamento do sinal óptico de determinada porta de entrada para uma porta específica na saída, baseado no comprimento de onda da OLT é usada para transmitir os comprimentos de onda que serão roteados para as diversas ONUs (*downstream*). No sentido de *upstream*, o OLT é equipado com um demultiplexador WDM para receber os comprimentos de onda das ONUs. (Figura 27)



Fonte: UFRJ, 2008.

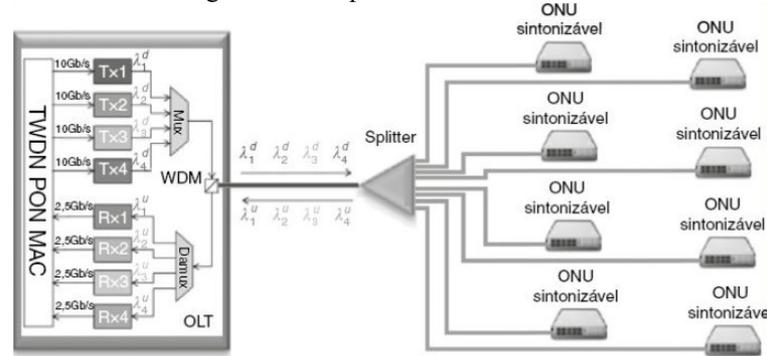


Fonte: PINHEIRO, 2017.

2.9.6 Twdm-pon – Time wavelength division multiplexing passive optical networking

Segundo o autor Pinheiro (2017av, posição 4449), a arquitetura *Time Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Networking* (TWDM-PON) segue as recomendações ITU-T G.989. É parte integrante das arquiteturas NG-PON2, combinando a abordagem WDM-PON com o suporte do GPON para vários usuários em cada comprimento de onda. Fornece quatro ou mais comprimentos de onda por fibra, cada uma capaz de entregar taxas de bits simétricos ou assimétricos de 10 Gbps ou 2,5 Gbps. Além disso, permite um crescimento escalar da rede e a convergência fixo-móvel. A arquitetura poderá ser usada no projeto das novas redes de acesso ópticas e, inclusive, na modernização dos sistemas PON atuais, permitindo o compartilhamento dos recursos das redes FTTx existentes. (Figura 29)

Figura 29 – Arquitetura TWDM-PON.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Tabela 1 – Comparação entre tecnologias pon.

Característica	Apon/Bpon	Gpon	Epon	G-Epon	10G-Epon	XG-pon
Padrões	ITU-T G.983	ITU-T G.984	IEEE.802.3a h	IEEE.802.3a h	IEEE.802.3 av	ITU-T G.987
Capacidade da transmissão	155/622 Mbits/s	2,5 Gbits/s	1 Gbits/s	1 Gbits/s	10 Gbits/s	10 Gbits/s
Tamanho dos pacotes de dados	Fixo de 53 <i>bytes</i>	Variável de 53 <i>bytes</i> a 1518 <i>bytes</i>	Variável de 64 <i>bytes</i> a 1518 <i>bytes</i>	Variável de 64 <i>bytes</i> a 1518 <i>bytes</i>	Variável de 64 <i>bytes</i> a 1518 <i>bytes</i>	Variável de 53 <i>bytes</i> a 1518 <i>bytes</i>
Protocolo	ATM	ATM/ <i>ETHERNET</i>	<i>ETHERNET</i>	<i>ETHERNET</i>	<i>ETHERNET</i>	ATM/ <i>ETHERNET</i>
Comprimento de onda <i>Downstream</i>	1480 a 1500 nm	1480 ou 1500 nm	1490 a 1510 nm	1490 nm	1577 a 1590 nm	1575 a 1580 nm
Comprimento de onda <i>upstream</i>	1260 a 1360 nm	1260 a 1360 nm	1310 nm	1310 nm	1310 nm	1260 a 1280 nm
Alcance	20 km	20 km	20 km	20 km	20 km	20 km
Taxa de fracionamento	1:32	1:128	1:32 e 1:16	1:16	1:128	1:64

Fonte: TELECO, 2013.

2.10 Ativos de rede óptica

2.10.1 OLT – Optical line terminal

De acordo com Kramer, Pesavento 2002, Gutierrez, et. all, 2005 (apud Ferreira 2011, p. 2) o terminal de linha óptica está localizado na central, constituindo-se em porta de enlace entre a rede de acesso e a rede metropolitana. A OLT controla e administra a transmissão das ONUs, precisando de um receptor que opere em modo de rajada (volumes esporádicos de tráfego). Rajadas são conjuntos de bits vindo de uma determinada ONU. Portanto, é preciso controlar os diferentes níveis de amplitude do sinal, já que as ONUs estão localizadas em distâncias diferentes do OLT. (Figura 30)

2.10.2 Módulo transceptor óptico

De acordo com Pinheiro (2017aw, posição 3756) um módulo transceptor óptico, ou simplesmente *transceiver*, é um dispositivo que combina transmissor e receptor óptico num só dispositivo eletrônico. Estes módulos compõem os equipamentos ativos na PON, sendo disponíveis atualmente sete modelos padrão.

Tabela 2 – Características dos modelos de transceptores ópticos.

SFP	Comprimentos de onda curtos e longos e WDM; Fast/Gigabit Ethernet e Fibre Channel; Distâncias até 100 km
SFF	Comprimentos de onda curtos e longos; Fast/Gigabit Ethernet e Fibre Channel; Distâncias até 80 km
XFP	Comprimentos de onda curtos e longos e DWDM; 10 Gbit Ethernet e 10x Fibre Channel; Distâncias até 80 km; Taxas de bit até 11,3 Gbps
XPAK	Comprimentos de onda curtos e longos; 10 Gbit Ethernet; Distâncias de até 10 km; Taxas bit até 10,5 Gbps
XENPAK	Comprimentos de onda curtos e longos; 10 Gbit Ethernet e 10x Fibre Channel; Distâncias até 10 km; Taxas de bit até 10,3 Gbps
PON	Comprimentos de onda longos; Redes de acesso GPON e GEPON; Distâncias até 20 km
GBIC	Comprimentos de onda curtos e longos e WDM; 1 Gbit Ethernet e Fibre Channel; Distâncias até 160 km

Fonte: PINHEIRO, 2017.

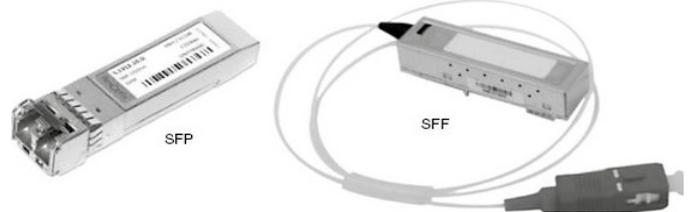
Conforme Pinheiro (2017ax, posição 3808) os transceptores para fibra óptica mais usados em redes passivas são a unidade externa plugável SFP (*Small Form-Factor Pluggable*), para inserção no equipamento, e a unidade interna SFF (*Small Form Factor*), fixada diretamente na placa eletrônica do equipamento. Uma das principais características dos módulos SFP é que eles podem ser inseridos ou retirados sem desligar a alimentação do equipamento de rede (são ditos *hot-pluggable*). (Figura 31)

Figura 30 – OLT GPON.



Fonte: DATACOM, 2018.

Figura 31 – Modelos de transceptores SFP e SFF.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

2.10.3 ONU – Optical network unit

De acordo com Pereira 2008 (apud Filho 2018, p. 32) a função dos fotodetectores dentro de uma ONU é absorver a luz transmitida pela fibra e convertê-la em corrente elétrica para processamento do receptor. O ideal é que os fotodetectores tivessem o maior alcance possível, operando nos menores níveis possíveis de potência óptica, e realizando a conversão com o mínimo de erros e de ruído, porém cada fabricante possui um valor máximo e mínimo de potências suportadas. (Figura 32)

A ONU em alguns modelos não fornece a tecnologia *wireless* IEEE 802.11, ela apenas recebe a fibra óptica e disponibiliza portas LAN para a distribuição da internet via cabo par metálico, para disponibilizar o sinal sem fio é necessário implementar um roteador, conectando a ONU e o roteador através de um *patch cord*. (FERRAUDO, 2019).

2.10.4 ONT – Optical network terminal

De acordo com Pinheiro (2017ay, posição 3853) um ONT é um equipamento eletrônico instalado diretamente em ambiente interno diretamente nas dependências do usuário, com o objetivo de proporcionar a conexão óptica com a PON e fazer a interface com o equipamento do usuário. Dependendo das necessidades de comunicação, pode incluir portas

Ethernet, portas para telefonia, capacidade de transmissão sem fio, geralmente WI-FI, saída de vídeo, entre outras funcionalidades.(Figura 33)

Figura 32 – Parte interna de uma ONU.



Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2020.

Figura 33 – ONT GPON.



Fonte: INTELBRAS, 20-?.

2.11 Passivos de rede óptica

2.11.1 Fibra óptica

De acordo com Bertolo 2012 (apud Eborgano; Santos 2018a, p. 2) as fibras ópticas são fabricadas nos tipos fibras monomodo e fibras multimodo. A monomodo possui núcleos pequenos (cerca de nove micrômetros, ou seja, nove milésimos de milímetro de diâmetro) e transmitem luz laser infravermelha (comprimento de onda de 1.300 a 1.550 nanômetros). As fibras multimodo possuem núcleos maiores (cerca de 62,5 milésimos de milímetro de diâmetro) e transmitem luz infravermelha (comprimento de onda = 850 a 1.300 nm) proveniente de LEDs.

De acordo com Tronco, Avila 2007 (apud Eborgano; Santos 2018b, p. 2) a comunicação óptica consiste em incluir a geração de luz por LED (*Light Emitting Diode* – Diodo Emissor de Luz) e lasers que será guiada pela fibra, a eventual amplificação devido às perdas nas fibras, a multiplexação e demultiplexação dos comprimentos de onda através de elementos dispersivos (prismas) ou difrativos (grades de difração). E por fim essa luz será

detectada e convertida em sinal elétrico novamente e assim a informação chega ao seu destinatário.

2.11.2 DIO – Distribuidor interno óptico

De acordo com Nunes 2016 (apud Filho 2018, p. 54), os distribuidores ópticos são utilizados na terminação ou na interconexão dos cabos de fibra óptica (as fibras provenientes do *backbone* são emendadas a *pigtails* e estas são abrigadas dentro da carcaça do DIO). Explicando de uma outra forma, um DIO serve para acomodar, organizar e proteger as fusões feitas entre os cabos ópticos e as extensões ópticas. (Figura 35)

2.11.3 CEO – Caixa de emenda óptica

As caixas de distribuição são responsáveis por abrigar e distribuir as fibras ópticas de uma rede. Elas recebem as fibras provenientes da OLT distribuem para as caixas de terminação óptica (CTO). (FILHO, 2018a. P. 55.) (Figura 34)

Figura 34 – Caixa de emenda óptica.



Fonte: FIBRACEM, 2017.

Figura 35 – Distribuidor óptico interno.



Fonte: FIBRACEM, 2018.

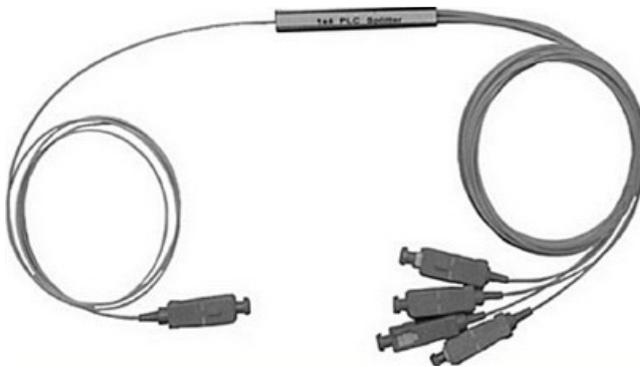
2.11.4 CTO – Caixa de terminação óptica

As caixas de terminação (ou caixa de atendimento) óptico possuem função semelhante às caixas de distribuição óptica. As caixas CTOs servem de interface entre as caixas CEOs e a casa do cliente onde está localizado a ONU/ONT. (FILHO, 2018b. P. 55). (Figura 37)

2.11.5 Divisores ópticos (Splitters)

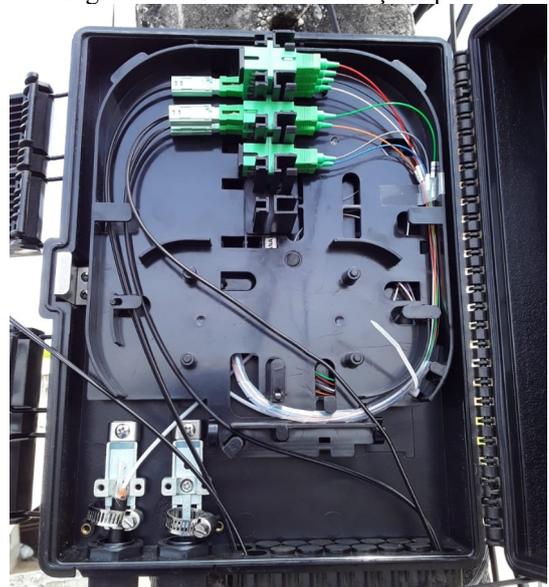
De acordo com Pinheiro (2017az, Posição 3546) Em muitos sistemas, há a necessidade de transmissão de sinal, simultaneamente, para dois ou mais acessos. O divisor óptico, comumente chamado de *splitter*, é um elemento passivo utilizado em redes ópticas que realiza a divisão do sinal óptico proveniente de uma fibra para N fibras, em razões usuais de 1:2, 1:4, 1:8, 1:32 e 1:64. Podem ser encontrados sob dois tipos básicos: balanceado e desbalanceado. (Figura 36)

Figura 36 – Splitter de 1:4.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Figura 37 – Caixa de terminação óptica.



Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2020.

a) splitter balanceado;

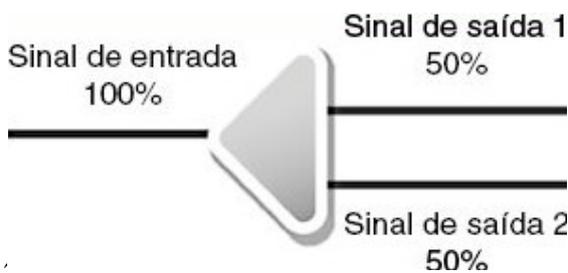
– de acordo com Cianet (2018, p. 4) o *splitter* balanceado, também chamado de PLC (*Planar Lightwave Circuit*), divide o sinal da entrada de forma simétrica nas saídas, fazendo com que ocorra a mesma perda em todas as saídas e é comumente utilizado quando se necessita de uma divisão maior que 2. Diferente do *splitter* desbalanceado, que possui apenas uma porta de entrada e limita-se a duas de saída. Os modelos de splitter balanceado encontrados no mercado variam de 2 a 128 portas de saída, podendo ter 1 ou 2 portas de entrada. A relação entre entrada e saída pode ser de 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64 e 1:128 conforme padronização da ITU-T G.984.2. Sendo que a relação entre entrada e saída de 1:2, 1:4, 1:8, 1:16 são as mais

comercializadas por empresas especializadas no mercado de provedores regionais de internet. (Figura 38)

b) splitter desbalanceado;

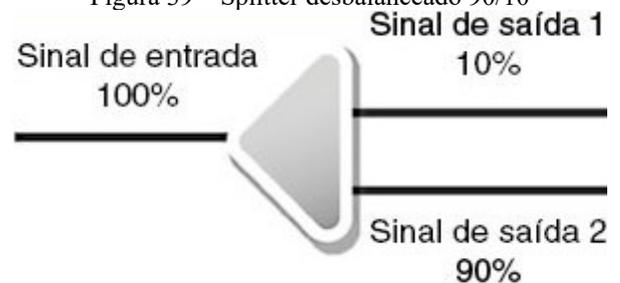
– de acordo com Cianet (2018, p. 2) o *splitter* desbalanceado, também conhecido como FBT (*Fused Biconical Taper*), possui uma porta de entrada e limita-se a duas portas de saída. Por ser um equipamento em que a sua utilização depende muito do modelo de topologia adotado e de uma aplicação específica, isso exige um projeto de rede bem elaborado pelos provedores de serviços de Internet (ISP's). (Figura 39)

Figura 38 – Splitter balanceado 1:2.



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Figura 39 – Splitter desbalanceado 90/10



Fonte: PINHEIRO, 2017.

2.13 Cidades inteligentes

Segundo o autor Barth (2016a, p. 27), cidades certamente são as maiores construções sociais da humanidade, não apenas devido a sua complexidade, mas por sua capacidade de aproximar pessoas e facilitar o encontro de interesses comuns. Os problemas das cidades são conhecidos, muitas vezes multidisciplinares e de solução complexa. Problemas ligados ao atendimento de demandas relacionadas à educação, saúde, mobilidade urbana e saneamento, entre outras, podem ser listados como prioridades dos gestores públicos e foco das empresas envolvidas na formatação e gestão de soluções para os ambientes urbanos.

De acordo com Lee et al., 2013 (apud Barth 2016b, p. 27), sugerem uma proposta de modelo para análise de cidades inteligentes que é listada a seguir: governo aberto, inovação de serviços, formação de parcerias, proatividade urbana, governança da cidade inteligente e integração da infraestrutura da cidade inteligente.

2.13.1 Algumas conectividades voltadas a cidades inteligentes

a) smart grid;

– conforme Barth (2016c, P. 27), as aplicações de *Smart Grid* (redes elétricas inteligentes) pretendem melhorar a relação consumo x produção de energia elétrica. Atualmente, a energia produzida e oferecida em determinados momentos é maior do que as necessidades reais devido à falta de informação imediata sobre a energia produzida e a real necessidade de consumo. Isso leva a um grande desperdício de recursos, a fim de evitar interrupções de fornecimento de energia elétrica. Neste sentido, novas arquiteturas foram propostas para que as redes elétricas inteligentes (*Smart Grid*) possam suportar não somente o fluxo de energia, mas também o fluxo de informação para obter a informação em tempo real de como a rede de energia elétrica está funcionando. Utilizando as tecnologias da informação e comunicação, redes inteligentes serão capazes de melhorar a rede de distribuição de energia elétrica, visando maior eficiência na entrega de energia e controlar em tempo real a sua produção. Portanto, uma infraestrutura de informação inteligente é fundamental para a implementação da *Smart Grid*.

b) smart parking;

– segundo o autor Barth (2016d, P. 29), a utilização generalizada das tecnologias sem fio, como redes de sensores sem fio e, em geral, as melhorias em aplicações sem fio, pode ser uma solução para os desafios de estacionamento. Redes de sensores sem fio parecem ser a melhor alternativa devido ao seu baixo custo de implantação nos lugares de estacionamento existentes e baixo consumo de energia. Em um ambiente de estacionamento inteligente, sensores sem fio serão colocados em cada vaga de estacionamento, e serão capazes de coletar e transmitir dados para o administrador do estacionamento;

– de acordo com Tesoriere et al. 2014 (apud Barth 2016e, p. 29), este sistema é descrito com uma abordagem em três camadas. O nível mais baixo é a função de detecção. Através da utilização de sensores distribuídos no espaço de estacionamento, será possível conhecer, em tempo real, os espaços livres deixados. O segundo nível é a transmissão de dados e o nível superior é o de processamento e armazenamento de dados e interface do cliente.

c) traffic vídeo monitoring;

– segundo o autor Firmino; Trevisan, 2012 (apud Barth 2016f, p. 29).O conceito de cidade inteligente está apontando para uma cidade que é mais segura e que consegue gerir de forma mais autônoma seus recursos. Estes incluem o sistema de transporte que é de grande

importância para o desenvolvimento de qualquer cidade. Quanto mais as pessoas escolhem viver nos centros das cidades, o gerenciamento de um sistema, como uma rede de estradas, torna-se cada vez mais complexo e desafiador. Uma infraestrutura de monitoramento de vídeo em toda a cidade, focado em locais críticos, auxiliará na gestão de tráfego mais eficiente. A implantação de câmeras nos cruzamentos, a fim de controlar os semáforos e o fluxo de veículos com base na imagem fornecida pelas câmeras é, provavelmente, a aplicação mais evidente;

– conforme Barth (2016g, P. 29), numa cidade inteligente, no entanto, os dados dos sensores podem ser recuperados a partir de uma variedade de aplicações através de dispositivos pertencentes a redes heterogêneas. Sistemas inteligentes de transporte do futuro, por exemplo, podem aproveitar a rede de câmeras para informar o condutor acerca de colisões e redirecionar o fluxo de veículos. A rede de comunicações deveria ser concebida e ter a capacidade de lidar com o tráfego de rede que pode ser produzido por qualquer dispositivo / sistema, de uma forma que permite uma cooperação perfeita com o resto dos sistemas inteligentes da cidade.

d) pon em rodovias;

– de acordo com Pinheiro (2017ba, posição 4507), o tráfego de informações em tempo real é um fator de grande relevância para aumento da produtividade, redução de perdas, retrabalho, otimização de recursos e diminuição de horas paradas, em qualquer atividade. Com as rodovias não é diferente e um estado de conservação adequado, com a presença de facilidades de operação e segurança para seus usuários são fundamentais para a economia e o meio ambiente. Rodovias com conservação deficiente aumentam o custo de manutenção da infraestrutura e dos veículos, além do consumo de combustível, lubrificantes e etc. Também existem as questões referentes aos “pontos críticos”, ou seja, as situações atípicas que ocorrem ao longo da rodovia e que podem trazer riscos à segurança dos usuários, além de custos adicionais de operação, devido à possibilidade de dano aos veículos, aumento do tempo de viagem ou elevação da despesa com combustíveis;

– segundo o autor Pinheiro (2017bb, posição 4507), os sistemas de automação em rodovias geralmente operam por meio de vários equipamentos interligados por uma rede em fibra óptica. através dessa rede, o CCO (Centro de Controle Operacional) da concessionária pode: monitorar a rodovia, acionar recursos de reparo mecânico, controlar o tráfego, socorrer em caso de acidentes, atender chamadas de emergência, atualizar condições do tempo e de tráfego etc. Considerando a capacidade de transmissão, superando o cabeamento metálico, as

infraestruturas de redes ópticas implantadas (ou a implantar) nas rodovias podem lançar mão da tecnologia PON, que permite otimizar a ocupação dos cabos ópticos, possibilitando um investimento menor e criando a disponibilidade de fibras para futuros projetos;

– conforme Pinheiro (2017bc, posição 4530), o uso da PON permite melhor interoperabilidade entre diversas aplicações, como integração com os sistemas de monitoramento por câmeras, radares de velocidade, contagem de veículos, painéis de mensagens, rotinas de praças de pedágio, entre outras facilidades. A rede de fibra é igualmente aproveitada em aplicações específicas, como sistemas de atendimento de emergência (sistemas *call box*), atendimento privativo da polícia rodoviária, entre outras. Ao se optar pelo uso de PON numa rede óptica existente, pode-se aumentar a disponibilidade de largura de banda sem que a rede de fibra óptica seja alterada. Neste caso, outra possibilidade oferecida por redes ópticas passivas é a negociação da capacidade ociosa junto aos operadores de telecomunicações, a título de tráfego de informações, visando interligação de centrais de telefonia fixa e móvel e também como redundância aos sistemas de comunicação de dados para empresas privadas e ISPs. Por esse motivo, as redes que utilizam a fibra óptica são chamadas de redes à prova do futuro.

e) pon em redes industriais;

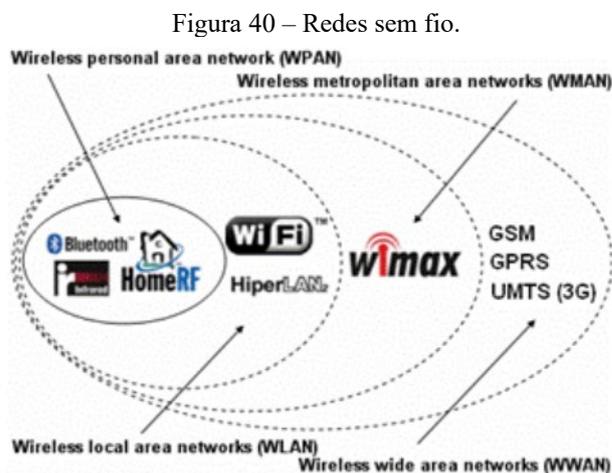
– de acordo com Pinheiro (2017bd, posição 4530), no caso das redes industriais, muitos sistemas com características de operação diferentes foram desenvolvidos para possibilitar o controle, a supervisão e o gerenciamento do processo industrial, e os meios físicos de transmissão estão relacionados com o cabeamento utilizado para a interconexão dos dispositivos. Como estratégia de evolução tecnológica, o cabo óptico pode se afirmar como uma solução de grande potencial para as redes locais. O acréscimo de serviços numa PON para o ambiente industrial é relativamente simples. A principal vantagem da arquitetura está na redução dos custos de implantação e de manutenção, pela ampliação da largura de banda disponível, sem a necessidade de aumento no número de componentes ativos na rede. Trata-se, pois, de uma solução que permite levar a fibra óptica até a sala de controle, o chão de fábrica ou a estação de trabalho com um custo inferior ao das redes locais tradicionais baseadas em cabeamento metálico;

– segundo o autor Pinheiro (2017be, posição 4530), como benefícios adicionais do emprego da tecnologia em ambientes industriais, tem-se: manutenção mais simples, custos de operação mais baixo e flexibilidade do gerenciamento quase ilimitada. A proteção do investimento, bem como o desembolso de manutenção, pode ser drasticamente reduzida. A solução de redes

ópticas passivas deve possibilitar a redução de investimentos na operação e manutenção de redes locais industriais. Esta redução de investimentos é possível porque se eliminam ativos de rede intermediários, como roteadores e equipamentos de borda, e se diminuem gastos com energia e pessoal para manutenção e operação, em razão da centralização dos ativos da rede em um único ponto. Além disso, simplifica-se a arquitetura das redes, desde o mapeamento até a lógica e a distribuição, com gerenciamento simples e, ao mesmo tempo, recursos avançados.

2.14 Tecnologias de acesso sem fio

As tecnologias *wireless* são conhecidas pelas suas vantagens como a flexibilidade e onipresença e, também pelas suas desvantagens como interferências e baixa largura de banda. Tecnologias que estão surgindo prometem reduzir essas desvantagens, já que as redes sem fio de alta performance são tendência para o futuro, principalmente para as cidades inteligentes. A (figura 40) demonstra algumas categorias de rede sem fio.



Fonte: TELECO, 2012.

2.14.1 Wpan – Wireless personal area network

WPAN (Rede pessoal sem fio), refere-se às redes sem fio de curta distância cujo alcance varia entre alguns centímetros a alguns metros. Geralmente é utilizada para conectar dispositivos como impressoras, celulares, assistente pessoal (PDA) e outros em curto alcance.

Algumas tecnologias WPAN existentes: *Bluetooth*, *ZigBee*, USB sem fio, infravermelho. (TELECO, 2012a. P 1).

2.14.2 Wlan – Wireless local area network

WLAN (Rede local sem fio), é uma rede que permite que aparelhos se conectem e comuniquem sem a necessidade de cabeamentos. Sendo o oposto da LAN que se conecta através de cabos. Ela é limitada a um raio que fica entre 100 a 300 m, dependendo da qualidade do equipamento, normalmente são usadas em escritórios, residências, escolas, laboratórios e etc. A principal tecnologia usada nessa categoria é o WiFi (*Wireless fidelity*). (TELECO, 2012b. P 1).

2.14.3 Wman – Wireless metropolitan area network

WMAN (Redes sem fio de área metropolitana), é uma rede sem fio com alcance aproximadamente do tamanho de uma cidade ou até mesmo um estado, podem ser de acesso ponto a ponto ou ponto a multiponto. A tecnologia mais conhecida nessa categoria é o WiMAX. (TELECO, 2012c. P 1).

2.14.4 Wmn – Wireless mesh network

WMN (Rede de malha sem fio), é uma rede formada por nós de rádio com uma topologia em malha. Refere-se a uma poderosa interconexão entre dispositivos ou nós. As redes em malha geralmente consistem em clientes *mesh*, malha de roteadores e *gateways*. A topologia *mesh* tem a tendência em ser mais estática. (TELECO, 2012d. P 1).

2.14.5 Wwan – Wireless wide area network

WWAN (Rede de longa distância sem fio), é uma rede que tem uma grande abrangência, ligando estados, países e até continentes. O principal dispositivo usado nesse alvo é o celular. (TELECO, 2012e. P 1).

3 REDES DE ACESSO HÍBRIDAS ÓPTICA-SEM FIO

Atualmente a infraestrutura de acesso com maior e melhor capacidade em atender o chamado *quadruplay* (serviços de internet, TV, telefonia e sem fio), no mesmo enlace e com eficiência é a tecnologia FTTX. As tecnologias abordadas nos próximos capítulos são voltadas para aplicações em geral, unindo a alta capacidade de transmissão de banda das fibras ópticas com a flexibilidade e onipresença *wireless*. Existem diversas variações de tecnologias de redes híbridas que podem ser implementadas em cidades inteligentes e as principais são apresentadas a seguir.

3.1 Marin – Metro and access ring integrated network

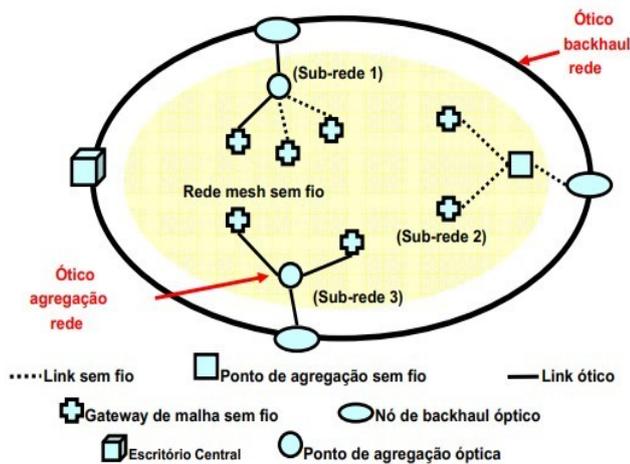
O MARIN, é uma rede híbrida de acesso óptico sem fio voltada para a área metropolitana, uma arquitetura composta em redes *mesh wireless* e *backhauls* ópticos reconfiguráveis de tecnologia PON. Podemos dizer que essa arquitetura é dividida em 3 camadas, iniciando na *central office*, onde é feita toda a gerência da infraestrutura da rede, com a topologia em anel fazendo uso de tecnologias de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) no *backhaul* óptico, responsável pelo transporte de dados em massa. A segunda camada é composta por sub-redes em árvore com link óptico, iniciando no nó do *backhaul* óptico e terminando nos *gateways* de malha sem fio. A última camada é constituída por *wireless mesh router*, fazendo o *front-end* da rede. (SHAW et al., 2007a).

Conforme KAZOVSKY et al., (2012a, p. 19) diz, o MARIN consiste nos seguintes elementos de rede:

- *Hub* óptico central que conecta a rede de anel óptico à rede de área ampla (WAN);
- Nós de *backbone* óptico que estão na rede de anel para rotear o tráfego do *hub* central para nós de agregação óptica;
- Nós de agregação óptica que agregam tráfego de *gateways* ópticos sem fio;
- *Gateways* ópticos sem fio que são a interface entre as redes de árvore óptica e a WMN; esses *gateways* podem lidar com tráfego óptico e sem fio; o tráfego sem fio que chega aos *gateways* ópticos sem fio é encaminhado de forma transparente a rede óptica;
- Roteadores de malha sem fio que só podem lidar com o tráfego sem fio e constituem o WMN.

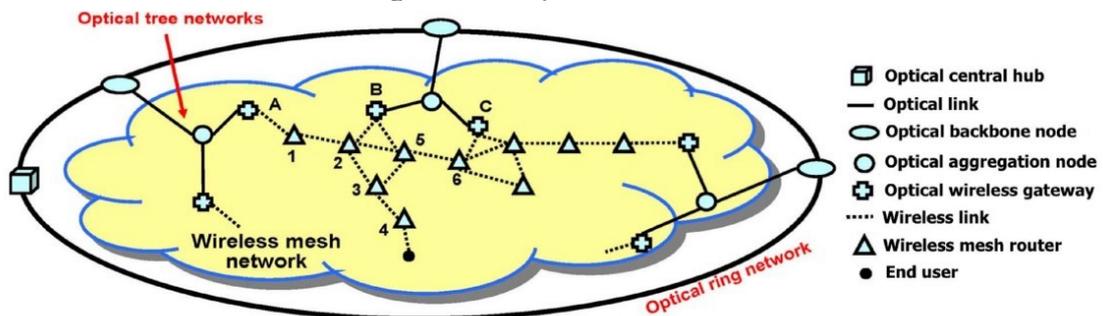
A (figura 41), mostra que a (sub-rede 1), começou a fazer migração do enlace sem fio entre o nó do *backhaul* e o *gateway*, por fibra óptica. A (Sub-rede 2) é uma topologia mais antiga e que será substituída em breve, não recomendada para *smart cities*. A proposta do projeto MARIN é exemplificada na (Figura 42), levando a fibra do escritório central até o *Optical wireless gateway*, diminuindo a latência, aumentando a largura de banda, escalabilidade e demais benefícios da fibra até a última milha. (SHAW et al., 2007b).

Figura 41 – Arquitetura MARIN sendo implantada.



Fonte: SHAW et al., 2007.

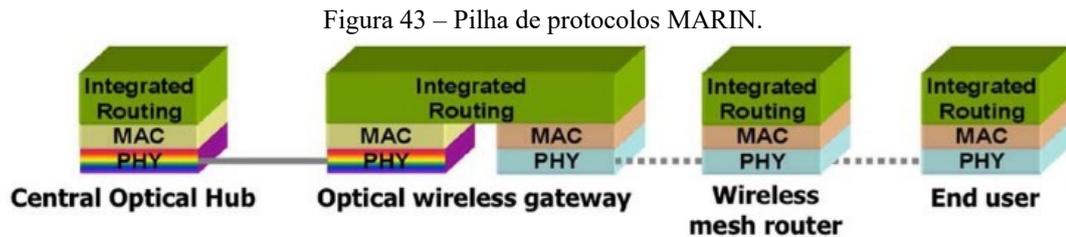
Figura 42 – Arquitetura MARIN.



Fonte: KAZOVSKY et al., 2012.

Sobre as rotas do MARIN, no sentido *upstream*, o fluxo é primeiro reunido em um *wireless mesh router* próximo e então direcionado para um *optical gateway wireless*. Por exemplo, na (figura 42), o *router* identificado como 4, reuni o tráfego dos usuários finais próximos e os retransmite pelos *routers* 3, 2 e 1, para chegar até o *gateway* A. Quando o tráfego alcança o *Optical wireless gateway*, ele é guiado de forma transparente até o *hub*

central ou *central office* através do *backhaul* óptico. Na direção *downstream*, os pacotes primeiramente são roteados para um dos *optical gateways wireless*, podendo ser o B e, então direcionado por uma rota específica, por exemplo, fazendo a rota pelos roteadores 5, 3 e 4, até chegar no destino final. É calculado em tempo real a rota do roteador e do *gateway* com base nas condições da rede. (KAZOVSKY et al., 2012b).



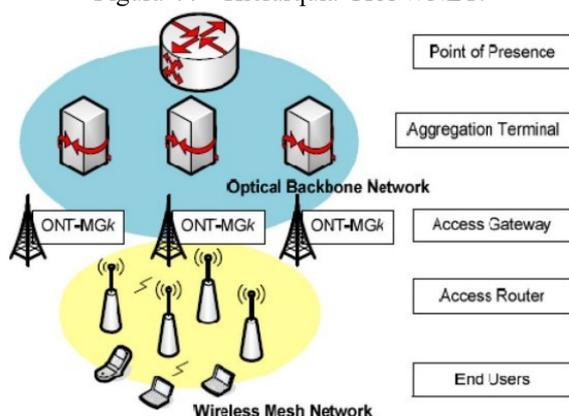
Fonte: KAZOVSKY et al., 2012.

De acordo com KAZOVSKY et al., (2012c, p. 19), (a figura 43) descreve a pilha de protocolos em cada um dos elementos da rede. Para simplificar, nós de *backbone* óptico e nós de agregação óptica não são mostrados. Como pode ser visto, os *gateways* ópticos sem fio têm pilhas de protocolos ópticos e sem fio que são combinados com um esquema de roteamento integrado que também é introduzido no MARIN.

3.2 Grownet – Grid reconfigurable optical and wireless network

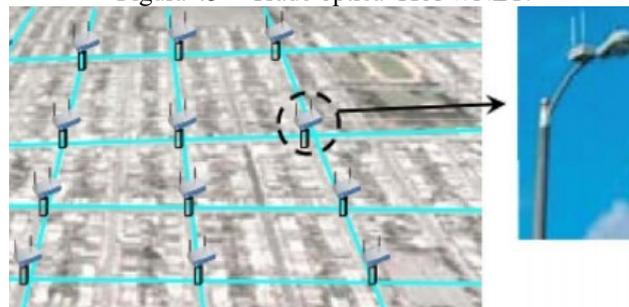
A rede óptica reconfigurável e rede sem fio (GROWNET), se comparado com o MARIN, apresenta uma estrutura que facilita uma inserção mais estreita dos segmentos *wireless* e óptico, específica para redes *intracity* de alta densidade, sua arquitetura tem o formato de grade nos *optical wireless gateway*, utilizando os recursos da fibra de forma mais eficiente. Apresenta uma infraestrutura integrada e hierárquica, visando facilitar o gerenciamento da rede de uma maneira eficaz e suprimindo mecanismos de compartilhamento de capacidade. (KAZOVSKY et al., 2012d).

Figura 44 – Hierarquia GROWNET.



Fonte: KAZOVSKY et al., 2012.

Figura 45 – Grade óptica GROWNET.



Fonte: KAZOVSKY et al., 2012.

A (figura 44), exhibe a hierarquia da GROWNET, os *access gateways* concede conectividade entre o *optical backbone network* e a *wireless mesh network*, os *access routers* atuam como nós intermediários, com os usuários se conectando na rede através deles. O *optical backbone* constitui-se em 3 camadas: o *point of presence*, *aggregation terminal* e os *access gateways* que faz a ligação entre o *backhaul* óptico à sub-rede malha sem fio. A *wireless mesh network* também é constituída em 3 camadas: o *access gateway*, *access routers* e os *end users*. Note que os *access gateways* servem como ponte entre as tecnologias sem fio e óptica. (KAZOVSKY et al., 2012e).

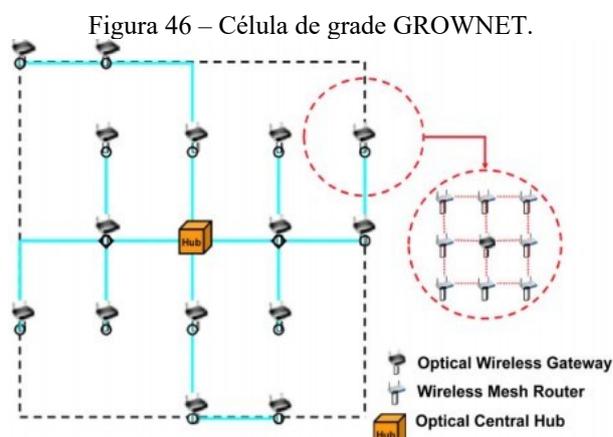
Em relação ao MARIN, a GROWNET vai adiante ao colocar *wireless mesh routers* em cruzamentos de ruas. Alguns desses *routers* recebem conexão com a fibra óptica e, passam a ser chamados de *optical wireless gateway*. Com a introdução de mais *gateways* pela cidade, fica mais fácil para os *wireless mesh routers* encontrá-los, diminuindo os saltos na rede *mesh*. É colocado um terminal óptico no cruzamento das conexões de fibra, já que a infraestrutura em formato de grade dos *gateways* e com a tecnologia da GROWNET que é na maioria das vezes baseada em uma malha retangular com vários WMNs, permite isso. (KAZOVSKY et al., 2012f).

Segundo KAZOVSKY et al., (2012g, p. 22), uma grade GROWNet é mostrada na (Figura 45), fornece *gateways* ópticos sem fio com conectividade de *backbone* de fibra por meio de uma infraestrutura de grade ultra-escalável. Essa infraestrutura é escalável porque fornece escalabilidade WDM por meio de um backbone óptico mostrado na (Figura 46). Além disso, a própria infraestrutura pode ser aprimorada usando um novo processo de particionamento de H-tree. Em cada estágio do processo de particionamento da árvore H, o

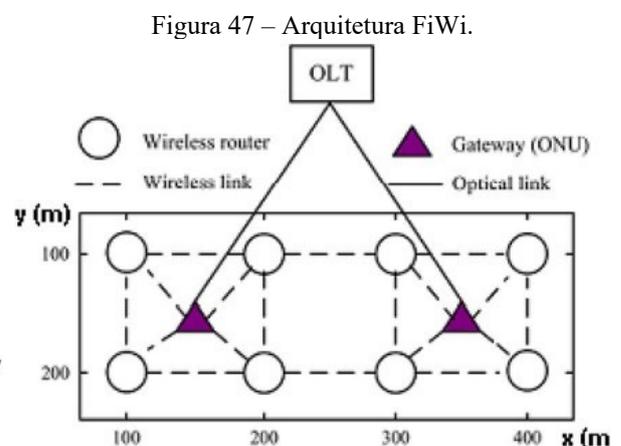
espaçamento entre roteadores mesh sem fio adjacentes é reduzido pela metade, assim como à distância de comunicação entre um roteador e um usuário. Isso reduz o número de saltos para os usuários e aumenta o rendimento efetivo. A arquitetura GROWNet consiste nos seguintes nós:

- Hub ótico central semelhante ao hub ótico central na arquitetura MARIN; conecta gateways óticos sem fio à rede de área ampla;
- gateways óticos sem fio que enviam dados para um roteador mesh sem fio próximo em um link sem fio ou para outro gateway ótico sem fio em um link óptico, dependendo das necessidades de roteamento;
- Roteadores mesh sem fio conectados aos usuários finais com links sem fio.

Conforme KAZOVSKY et al., (2012h, p. 22) diz, GROWNet emprega um modelo de rede de respiração de célula coordenada para equilibrar o tráfego de rede usando controle dinâmico de energia para sistemas EPON-WiMAX. Ao alterar a potência transmitida, o diâmetro da célula é alterado e também o número de UE (equipamentos de usuário) servidos. Um protocolo de controle multiponto (MPCP) para um TDM-PON foi proposto para implementar um mecanismo de respiração de célula multicanal. Isso foi feito por meio da introdução de duas estruturas extras para obter controle de potência e *feedback* de carga. O desempenho da rede foi avaliado por meio de simulações; os resultados mostraram um aumento significativo na taxa de transferência em situações de distribuição de tráfego desigual. Os números de melhoria podem chegar a 40% para redes pesadamente carregadas.



Fonte: KAZOVSKY et al., 2012.



Fonte: KAZOVSKY et al., 2012.

3.3 Fiwi – Fiber-wireless

As redes de acesso FiWi (Fibra sem fio) tem como objetivo alinhar a grande quantidade de largura de banda, ofertadas pelas redes ópticas passivas, com a onipresença e mobilidade que as redes de acesso *wireless* dispõem, (por exemplo, WiFi e WiMAX), oferecendo uma conexão ponto a ponto entre os nós sem fio que são conectadas diretamente nas ONUs, com a meta de reduzir gastos e complexidades. É uma plataforma que pode ser usada em aplicações, serviços e tecnologias emergentes. (GHAZISAIDI; MAIER, 2011a).

Opostamente a arquitetura PON usual, as interlocuções inter-ONU podem ser realizadas diretamente, não absolutamente através da OLT. Como mostrado na (figura 47). (KAZOVSKY et al., 2012i).

De acordo com GHAZISAIDI e MAIER (2009b, p. 4), existem duas tecnologias usadas para implementar redes de fibra sem fio (FiWi):

- **Espaço livre óptico (FSO)**, também conhecido como sem fio óptico (OW), é um tipo de comunicação óptica de linha de visão direta (LOS) que fornece conexões ponto a ponto modulando feixes visíveis ou infravermelhos. Oferece grande largura de banda e comunicações confiáveis em curtas distâncias. A portadora de transmissão é gerada implantando um diodo emissor de luz (LED) de alta potência ou um diodo laser, enquanto o receptor pode implantar um fotodetector simples. Os sistemas FSO atuais operam em modo full-duplex a uma taxa de transmissão que varia de 100 Mb / sa 2,5 Gb / s, dependendo em grande parte das condições climáticas. Dada uma clara LOS entre a origem e o destino e potência de transmissor suficiente, as comunicações FSO podem funcionar em distâncias de vários quilômetros. Tanto na origem quanto no destino, a fibra óptica pode ser usada para construir LANs de alta velocidade, como Gigabit Ethernet (GbE).
- **Rádio sobre fibra (RoF)**, por outro lado, permite que um link óptico analógico transmita um sinal de radiofrequência (RF) modulado. As redes RoF fornecem conexões P2P e ponto a multiponto.

Tabela 3 – Comparação entre FSO e RoF.

Recurso	FSO	RoF
Conectividade	Ponto a ponto	Ponto a ponto e ponto a multiponto
Modo de transmissão	Full duplex	Full duplex

Escalabilidade	Alto em termos de largura de banda, baixo em termos de usuário e serviço	Baixo em termos de largura de banda, alto em termos de usuário e serviço
Disponibilidade	Baixo no nevoeiro, alta na chuva	Alto no nevoeiro, baixo na chuva
Interferência	Luz solar de fundo	Sinais eletromagnéticos
Licença Spectrum	Não requerido	Requeridos

Fonte: GHAZISAIDI; MAIER, 2009.

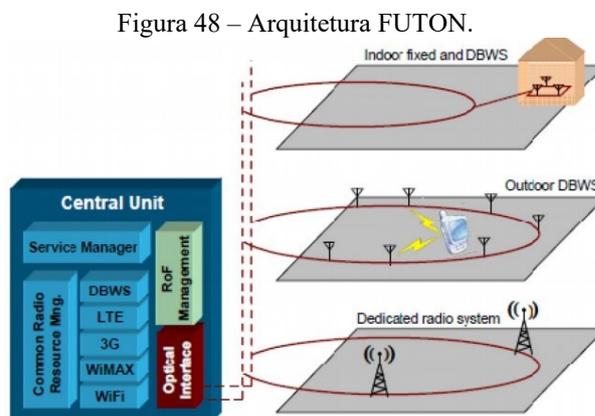
Existem algumas formas de integração de arquiteturas FiWi, de acordo com GHAZISAIDI e MAIER (2009c, p. 4), a princípio são 4 arquiteturas:

- **Arquitetura Independente:** Nesta abordagem, estações bases WiMAX, atendem os *mobile client node*, são conectadas a uma unidade de rede óptica (ONU), assim como qualquer outro nó assinante com fio, em que uma ONU denota o equipamento EPON nas instalações do cliente. As redes WiMAX e EPON são conectadas por meio de uma interface padronizada comum (por exemplo, *Ethernet*) e operam independentemente uma da outra.
- **Arquitetura Híbrida:** Esta abordagem introduz uma estação base ONU (ONU-BS) que integra o EPON ONU e o WiMAX BS tanto no *hardware* quanto no *software*. O ONU-BS integrado controla a alocação dinâmica da largura de banda tanto do ONU quanto do BS.
- **Arquitetura Orientada a Conexão Unificada:** Semelhante à arquitetura híbrida, esta abordagem implanta uma ONU-BS integrada. Mas, em vez de transportar quadros *Ethernet*, são usadas unidades de dados de protocolo WiMAX MAC (PDUs) contendo vários quadros *Ethernet* encapsulados. Ao transportar PDUs MAC WiMAX, a arquitetura unificada pode ser executada como uma rede WiMAX com a capacidade de conceder largura de banda usando a alocação de largura de banda orientada para conexão do WiMAX em vez da alocação de largura de banda orientada para fila do EPON.
- **Arquitetura de micro-ondas sobre fibra:** Nesta abordagem, o sinal WiMAX é modulado em uma frequência portadora sem fio e, em seguida, multiplexado e modulado junto com o sinal EPON de banda base em uma frequência óptica comum (comprimento de onda) na ONU-BS. O nó central consiste em um terminal de linha óptica EPON convencional (OLT) e um WiMAX BS central, denominado macro-BS. O

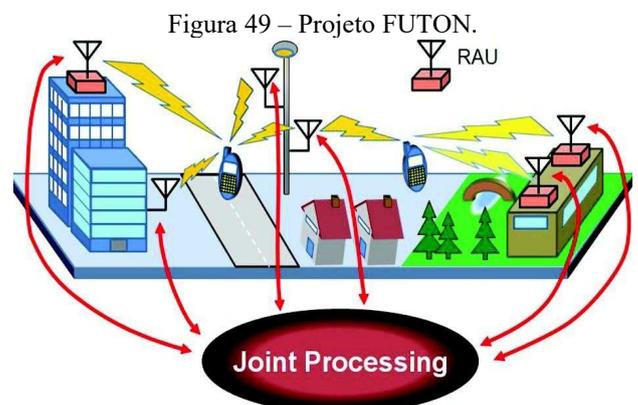
OLT processa o sinal da banda base EPON, enquanto o macro-BS processa os pacotes de dados originados de várias unidades WiMAX BS.

3.4 Futon – Fiber-optic networks for distributed extendible heterogeneous radio architectures and service provisioning

O propósito da Rede de fibra óptica para extensão heterogênea e distribuída de arquitetura de rádios para provisionamento de serviços (FUTON), consiste em uma infraestrutura de rede híbrida de fibra-rádio, conectando unidades de antenas remotas de baixa complexidade (RAUs) a uma unidade central (CU) através de links ópticos transparentes. No projeto é utilizado um sistema de antenas distribuídas (DAS), em coordenação com a CU onde é realizado o processamento de sinais e gerenciamento dos recursos, é proposto a fim de oferecer transmissão de banda em grandes quantidades para futuras redes *wireless*. A (figura 48) mostra a arquitetura FUTON, na qual ilustra quando estão presentes diferentes sistemas na mesma região, a unidade central recebe a conexão das RAUs através do sistema fibra óptica, apontado por linhas tracejadas. (KAZOVSKY et al., 2012j).



Fonte: KAZOVSKY et al., 2012.



Fonte: BARTH, 2016.

Essa infraestrutura usa estações rádio bases simplificadas nomeadas de RAU em vez de utilizar as tradicionais estações rádio base (ERB) para cobrir uma região interligada com fibra óptica até a *central unit* (UC). As estações simplificadas são transceptores multifrequências transparentes, que recebem e enviam sinais de rádio aos usuários. Ao

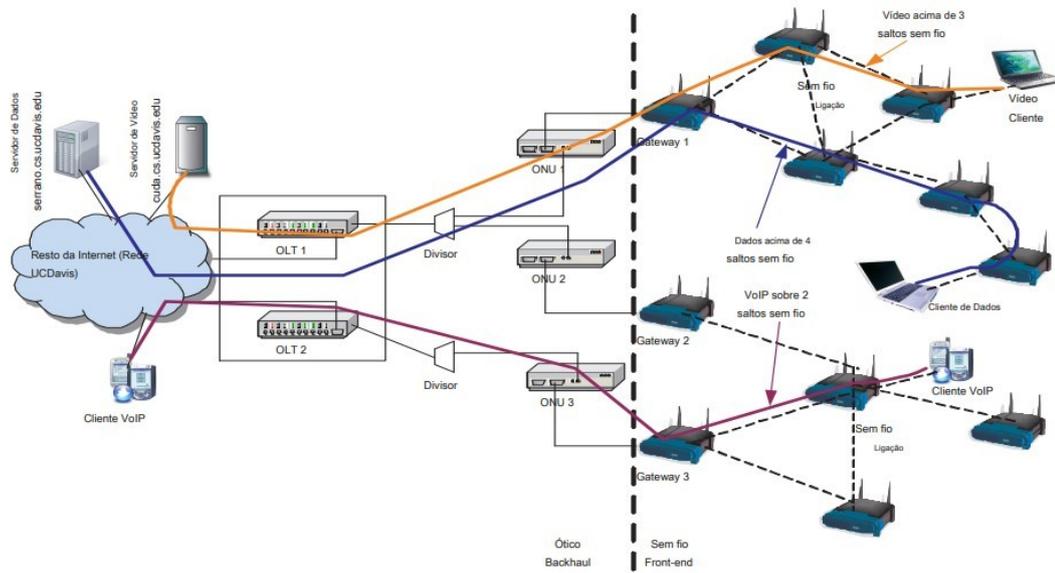
começar do RAU, os sinais de rádio são retransmitidos para a unidade central utilizando RoF. (BARTH, 2016h).

3.5 Woban – Wireless-optical broadband access network

A rede de acesso de banda larga óptica sem fio (WOBAN), constitui-se resumidamente por uma infraestrutura cabeada via óptica (*Back-End*) e por uma conexão sem fio em malha (*Front-End*), para atender os usuários e aplicações finais. Na arquitetura WOBAN, um segmento PON inicia-se na extremidade principal denominada de escritório central de telecomunicações com um ou mais OLTs, através de um *back-end* a OLT envia os dados até as ONUs alocadas em pontos estratégicos na cidade. São diretamente conectadas nas ONUs os chamados *gateways wireless* ou roteadores de entrada, que conversam com os roteadores dos usuários finais. Uma OLT tem a capacidade de se comunicar com várias ONUs, cada ONU pode manter vários roteadores de entrada sem fio e cada *gateways wireless* podem manter vários roteadores sem fio que atendem os usuários ou aplicações finais. (SARKAR; DIXIT; MUKHERJEE, 2007).

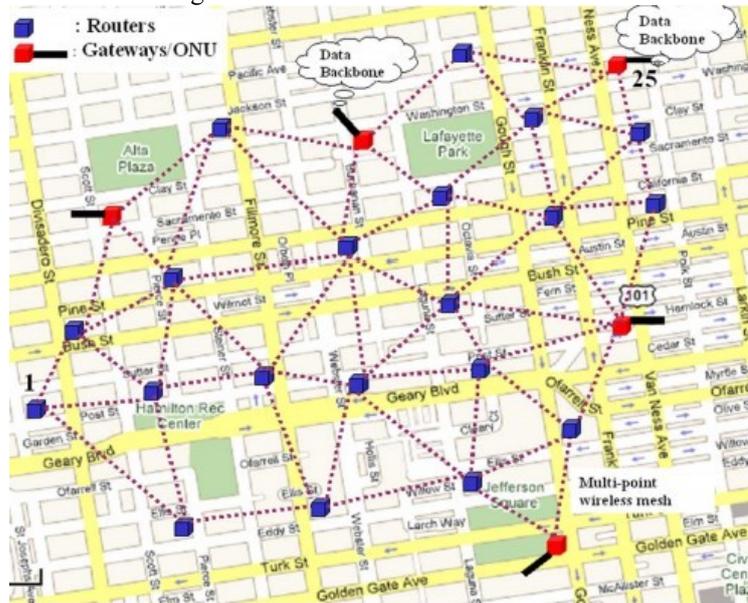
Segundo KAZOVSKY et al., (2012L, p. 8), os WOBANs podem ser mais econômicos do que as redes fixas tradicionais, uma vez que a fibra não chega às instalações de cada usuário. Os usuários se conectam às ONUs usando links sem fio, e os dados de uma ONU para uma OLT são enviados via fibras ópticas. Além disso, os WOBANs podem ser mais robustos do que as redes fixas tradicionais. Nas topologias PON tradicionais, se uma fibra entre o divisor e a ONU for cortada, essa ONU perderá a conexão com seus clientes. Além disso, um possível corte de fibra entre um divisor e um CO resultará na perda de conexão para as ONUs atendidas pelo divisor correspondente. No entanto, em WOBANs, os usuários podem formar uma rede *mesh multihop* e podem encontrar outras ONUs que ainda estão operando. Dessa forma, caminhos alternativos podem ser encontrados em casos de falhas de fibra. Portanto, os WOBANs podem ser mais tolerantes a falhas do que as redes fixas tradicionais. Além disso, Os WOBANs são mais flexíveis do que as redes sem fio tradicionais porque os usuários podem se conectar uns aos outros. O WiFi pode ser usado para o *front-end* sem fio em WOBANs.

Figura 50 – Arquitetura WOBAN.



Fonte: CHOWDHURY et al., 2009.

Figura 51 – WOBAN em San Francisco.



Fonte: SARKAR; DIXIT; MUKHERJEE, 2007.

	Flexibilidade	Integração óptica-sem fio
WOBAN	Rede <i>mesh</i> sem fio nas instalações do usuário	Os usuários se conectam à rede por meio de links sem fio integrados ao <i>backhaul</i> óptico
MARIN	Anel wdm reconfigurável com wmn	Roteamento integrado e balanceamento de carga
GROWNet	Malha wdm reconfigurável	<i>Backhaul</i> óptico suporta transporte coerente
FUTON	Processamento conjunto de sinais de rádio na unidade central	Rádio transparente sobre <i>backhaul</i> de fibra

Fonte: KAZOVSKY et al., 2012.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste trabalho foi desenvolvido uma pesquisa bibliográfica, como ensina Fonseca 2002, p. 32 (apud METTZER 2019), “A pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites”. Trazendo assuntos relacionados a redes híbridas. As fontes bibliográficas mais usadas para o desenvolvimento deste TCC foram, sites como o da teleco; O Ebook, redes ópticas de acesso em telecomunicações; Artigos da IEEE e outros trabalhos de conclusão de curso e artigos.

Não teve um local específico de pesquisa, pois foi desenvolvido em um momento de pandemia, que impossibilitou o nosso acesso na biblioteca da instituição para desfrutar dos livros que lá possuem. A forma de coleta de dados foi realizada através de pesquisas na internet, utilizando artigos, sites, fóruns, e-books, videoaulas e entre outros, todas as formas de reunir informações foram utilizadas e muito úteis, sempre dando créditos aos autores.

5 CRONOGRAMA

Realização de cada uma das atividades de pesquisa.

Etapa 2020	Dez	Etapa 2021	Jan	Fev	Mar	Abril
Delimitação tema	X					
Entrega da ficha de aceite de orientação	X					
Objetivos gerais e específicos			X			
Justificativa			X			
Metodologia			X			
Introdução			X	X	X	
Fundamentação teórica	X		X	X	X	
Aplicação da pesquisa	X		X	X	X	
Referências	X		X	X	X	
Agradecimentos					X	
Resumo e Abstract					X	
Orientação com o professor-orientador	X		X	X	X	X
Conclusão						X
Revisão geral do TCC						X
Defesa do TCC						X

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho desenvolveu-se de forma concisa um levantamento de arquiteturas de redes híbridas que podem ser implementadas em cidades inteligentes. A elaboração dessa pesquisa agregou bastante em nosso conhecimento, já que atuamos no mercado de telecomunicações e ajudará a trabalhos futuros de outros acadêmicos, tendo em vista que foi revisado no capítulo 2 as principais tecnologias que são utilizadas na internet, norteando um estudo mais profundo a quem interessar-se a fazê-lo, o material estudado no capítulo 3 é de difícil acesso e pouco divulgado na internet em língua portuguesa de forma gratuita, inclusive o material do capítulo citado é novidade para os autores deste trabalho.

De forma resumida a arquitetura de rede híbrida é composta de *backhauls* cabeados ópticos e um *front-end* sem fio em malha, há diversas formações topológicas possíveis para se implementar em cidades inteligentes, cabe ao projetista escolher qual se encaixa melhor no seu projeto.

As cidades inteligentes têm como objetivo implementar o máximo das tecnologias existentes no mercado a seu favor, visando soluções para as cidades e melhorando a qualidade de vida da população, colocando as tecnologias à disposição da educação, saúde, segurança, mobilidade urbana, iluminação, energia e vários outros.

Todas as arquiteturas híbridas apresentadas no capítulo 3 tem vários aspectos em comum, porém, cada uma delas tem seu diferencial, vantagens e desvantagens, portanto as arquiteturas recomendadas para se implementar em cidades inteligentes, são as que no seu *backhaul* óptico utilizam-se da tecnologia WDM, devido a grande quantidade de dados que podem trafegar ao mesmo tempo em um único enlace óptico, perda de pacotes e tempo de resposta mínima possível, que é de fundamental importância para o funcionamento adequado de suas aplicações inteligentes.

A MARIN é uma arquitetura de rede projetada para áreas metropolitanas, possui anel óptico WDM reconfigurável com *wireless mesh router* no *front-end*, nessa arquitetura é realizado o roteamento integrado e balanceamento de carga. A GROWNet apresenta uma malha wdm reconfigurável, ela é específica para redes *intracity* sua arquitetura tem o formato de grade nos *optical wireless gateway*, utilizando os recursos da fibra de forma mais eficiente se comparada ao MARIN. Essas duas arquiteturas são recomendadas para cidades inteligentes.

REFERÊNCIAS

ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050. **ONU**, 19 fev. 2019. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>>. Acesso em: 26 jan. 2021.

COM maior uso da internet durante a pandemia, número de reclamações aumenta, especialistas apontam problemas mais comuns. **G1**, 11 ago. 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/tecnologia/noticia/2020/06/11/com-maior-uso-da-internet-durante-pandemia-numero-de-reclamacoes-aumenta-especialistas-apontam-problemas-mais-comuns.ghtml>>. Acesso em: 27 jan. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017a, b. *E-book* (Posição 825). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 27 jan. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017c. *E-book* (Posição 841). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 27 jan. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017d, e. *E-book* (Posição 855). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 27 jan. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017f, g. *E-book* (Posição 868). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 28 jan. 2021.

IMPLEMENTAÇÃO da tecnologia 5G no contexto da transformação digital e indústria 4.0. **IPEA**, Jan. 2021. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/10419/1/NT_79_Diset_ImplementacaoTecnologia5G_Industria4.0.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017h. *E-book* (Posição 884). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 30 jan. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017i. *E-book* (Posição 898). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 30 jan. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017j. *E-book* (Posição 913). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 30 jan. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017k. *E-book* (Posição 3719). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

WEIK, Martin. Rede de comunicação de longa distância. **Springer**, 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F1-4020-0613-6_10626#howtocite>. Acesso em: 02 fev. 2021.

FEEDER line (network). **Wikipedia**, 19 fev. 2021. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Feeder_line_\(network\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Feeder_line_(network))>. Acesso em: 04 mar. 2021.

INTRODUÇÃO ao PON: Aprendendo sobre OLT, ONU, ONT e ODN. **Iperius**, 26 ago. 2020. Disponível em: <<https://www.iperiusbackup.net/pt-br/introducao-ao-pon-aprendendo-sobre-olt-onu-ont-e-odn/>>. Acesso em: 04 mar. 2021.

O que é backbone. **Canaltech**. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/telecom/o-que-e-backbone/#:~:text=Essa%20grande%20espinha%20dorsal%20%C3%A9,qualquer%20rede%20por%20meio%20dele>>. Acesso em: 03 fev. 2021.

POINT of presence. **Wikipedia**, 07 out. 2019. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Point_of_presence>. Acesso em: 03 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017L. *E-book* (Posição 4570). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 03 fev. 2021.

ENTENDA o que é uma rede fttx. **Fibracem**, 14 fev, 2019. Disponível em: <<https://www.fibracem.com/curiosidades/entenda-o-que-e-uma-rede-fftx/>>. Acesso em: 03 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017m, n. *E-book* (Posição 4622). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 05 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017o, p. *E-book* (Posição 4631). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 05 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017q. *E-book* (Posição 4644). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 05 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017r, s. *E-book* (Posição 4667). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 05 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017t, u, v. *E-book* (Posição 4688). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 05 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017w. *E-book* (Posição 4709). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 05 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017x, y, z. *E-book* (Posição 1532). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 06 fev. 2021.

TELEFONIA Digital: Multiplexação de Sinais. **Teleco**, 10 dez. 2007. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialconvdados/pagina_4.asp>. Acesso em: 03 mar. 2021.

REDES óptica passivas I: conceitos. **Teleco**, 07 abril. 2011. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialropassiva1/pagina_3.asp>. Acesso em: 06 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017aa, ab. *E-book* (Posição 1557). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 06 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017ac. *E-book* (Posição 1575). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 06 fev. 2021.

OUTRAS tecnologias wdm. **Ufrj**, 201?a, b, c, d. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/04_1/wdm/futuro.html>. Acesso em: 17 fev. 2021.

REDES mpls I: O protocolo MPLS. **Teleco**, 22 abril. 2013. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialmplscam/pagina_3.asp>. Acesso em: 01 mar. 2021.

GOUVEIA, Luís; PATRICIO, Pedro; SOUSA, Amaro; VALADAS, Rui. MPLS over WDM network design with packet level QoS constraints based on ILP models. **IEEE**, 2003a, b. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1208708>>. Acesso em: 01 mar. 2021.

FILHO, Esdras. **Dimensionamento de uma rede de fibra óptica pon ftth**. Ufersa, Caraúbas – Rio Grandes do Norte 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/3035/2/ESDRASAMF_MONO.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2021.

MULLER, João. Rede PON – tudo o que você precisa saber. **Cianet**, 28 fev. 2020. Disponível em: <<https://www.cianet.com.br/blog/infraestrutura-e-tecnologia/o-que-e-pon-lan-rede-optica-passiva/>>. Acesso em: 07 fev. 2021. (P. 2).

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017ad, ae. *E-book* (Posição 4162). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 07 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017af. *E-book* (Posição 4177). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 07 fev. 2021.

MELO, Leonardo; NUNES, André. **Projeto de rede via fibra óptica**. Riuni, Palhoça – Santa Catarina 2011. Disponível em:

<https://riuni.unisul.br/bitstream/handle/12345/3534/105267_Leonardo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 fev. 2021. (P. 43).

DIFERENÇA entre EPON e GPON nos projetos de rede. **Intelbras**, 26 fev. 2018a, b.

Disponível em: <<https://blog.intelbras.com.br/diferenca-entre-epon-e-gpon/>>. Acesso em: 07 fev. 2021.

MELO, Leonardo; NUNES, André. **Projeto de rede via fibra óptica**. Riuni, Palhoça – Santa Catarina 2011. Disponível em:

<https://riuni.unisul.br/bitstream/handle/12345/3534/105267_Leonardo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 fev. 2021. (P. 44).

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017ag. *E-book* (Posição 4295). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em:

<<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017ah, ai, aj. *E-book* (Posição 4358). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em:

<<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017ak, al. *E-book* (Posição 4376). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em:

<<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017am, an. *E-book* (Posição 4375). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em:

<<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017ao, ap. *E-book* (Posição 4394). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em:

<<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017aq, ar. *E-book* (Posição 4407). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em:

<<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017as, at, au. *E-book* (Posição 4427). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em:

<<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017av. *E-book* (Posição 4449). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em:

<<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

FERREIRA, Rafael. Redes ópticas passivas I: conceito. **Teleco**, Teresina – pauí, 07 abril. 2011. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialropassiva1/pagina_3.asp>. Acesso em: 10 fev. 2021. (P. 2).

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017aw. *E-book* (Posição 3756). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017ax. *E-book* (Posição 3808). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

FILHO, Esdras. **Dimensionamento de uma rede de fibra óptica pon ftth**. Ufersa, Caraúbas – Rio Grandes do Norte 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/3035/2/ESDRASAMF_MONO.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2021. (P. 32).

FERRAUDO, Gabriel. **Cianet**, 16 ago. 2019. Disponível em: <<https://www.cianet.com.br/blog/infraestrutura-e-tecnologia/onu-bridge/>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017ay. *E-book* (Posição 3853). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

EBORGANO, Enio; SANTOS, Guilherme. **Teleco**, Belo horizonte, 22 jan. 2018a, b. **Tutoriais Redes Ópticas**. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredesftth/pagina_2.asp>. Acesso em: 11 fev. 2021. (P. 2)

FILHO, Esdras. **Dimensionamento de uma rede de fibra óptica pon ftth**. Ufersa, Caraúbas – Rio Grandes do Norte 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/3035/2/ESDRASAMF_MONO.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2021. (P. 54).

FILHO, Esdras. **Dimensionamento de uma rede de fibra óptica pon ftth**. Ufersa, Caraúbas – Rio Grandes do Norte 2018 a, b. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/3035/2/ESDRASAMF_MONO.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2021. (P. 55).

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017az. *E-book* (Posição 3546). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 11 fev. 2021.

SPLITTER balanceado. **Cianet**, 14 ago. 2018. Disponível em: <<https://www.cianet.com.br/blog/infraestrutura-e-tecnologia/splitter-quando-utilizar-os-modelos-balanceado-e-desbalanceado/>>. Acesso em: 12 fev. 2021. (P. 4).

SPLITTER desbalanceado. **Cianet**, 14 ago. 2018. Disponível em: <<https://www.cianet.com.br/blog/infraestrutura-e-tecnologia/splitter-quando-utilizar-os-modelos-balanceado-e-desbalanceado/>>. 12 fev. 2021. (P. 2).

BARTH, Márcio. **Otimização multinível para projeto de redes híbridas (óptica e sem fio) para implementação de cidades inteligentes**. Unisinos, São Leopoldo – Rio Grande do Sul 2016a, b, c. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/6092/M%c3%a1rcio%20Joel%20Barth_.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 28 jan. 2021. (P. 27).

BARTH, Márcio. **Otimização multinível para projeto de redes híbridas (óptica e sem fio) para implementação de cidades inteligentes**. Unisinos, São Leopoldo – Rio Grande do Sul 2016d, e, f, g. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/6092/M%c3%a1rcio%20Joel%20Barth_.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 28 jan. 2021. (P. 29).

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017ba, bb. *E-book* (Posição 4507). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 28 jan. 2021.

PINHEIRO, José. **Redes ópticas de acesso em telecomunicação**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017bc, bd, be. *E-book* (Posição 4530). ISBN Digital: 978-85-352-8613-7. Disponível em: <<https://ler.amazon.com.br/?asin=B07CB353C6>>. Acesso em: 28 jan. 2021.

REDES sem fio: tecnologias de redes sem fio. **Teleco**, 29 out. 2012a, b, c, d, e. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredespaid/pagina_3.asp>. Acesso em: 06 mar. 2021.

SHAW, Wei-tao; WONG, Shing-wa; CHENG, Ning; KAZOVSKY, Leonid. MARIN Hybrid Optical-Wireless Access Network. **IEEE**, 2007a, b. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4348710>>. Acesso em: 09 de fev de 2021.

KAZOVSKY, Leonid; WONG, Shing-wa; AYHAN, Tolga; ALBEYOGLU, Kadir; RIBEIRO, Moises; SHASTRI, Anujit. Hybrid Optical–Wireless Access Networks. **IEEE**, 2012a, c, g, h, l Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6168211>>. Acesso em: 19 fev. 2021.

KAZOVSKY, Leonid; WONG, Shing-wa; AYHAN, Tolga; ALBEYOGLU, Kadir; RIBEIRO, Moises; SHASTRI, Anujit. Hybrid Optical–Wireless Access Networks. **IEEE**, 2012b, d, e, f, i, j. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6168211>>. Acesso em: 20 fev. 2021.

GHAZISAIDI, Navid; MAIER, Martin. Fiber-wireless (FiWi) access networks: Challenges and opportunities. **IEEE**, 2011a. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5687951>>. Acesso em: 22 fev. 2021.

GHAZISAIDI, Navid; MAIER, Martin. Fiber-wireless (FiWi) access networks: Challenges and opportunities. **IEEE**, 2011b, c. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5687951>>. Acesso em: 22 fev. 2021.

BARTH, Márcio. **Otimização multinível para projeto de redes híbridas (óptica e sem fio) para implementação de cidades inteligentes.** Unisinos, São Leopoldo – Rio Grandes do Sul 2016h. Disponível em:

<http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/6092/M%c3%a1rcio%20Joel%20Barth_.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 fev. 2021.

SARKAR, Suman; DIXIT, Sudhir; MUKHERJEE, Biswanath. Hybrid Wireless-Optical Broadband-Access Network (WOBAN): A Review of Relevant Challenges. **IEEE**, 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4357916>>. Acesso em: 09 fev. 2021.

PESQUISA bibliográfica: material completo com 5 dicas fundamentais. **Mettzer**, 2019. Disponível em: <<https://blog.mettzer.com/pesquisa-bibliografica/>>. Acesso em: 13 out. 2020.

BRASIL chega a 10,764 milhões de acessos em fibra na banda larga fixa. **Teletime**, 26 mar. 2020. Disponível em: <<https://teletime.com.br/26/03/2020/brasil-chega-a-10764-milhoes-de-acessos-em-fibra-na-banda-larga-fixa/>>. Acesso em: 13 out. 2020.