

Universidade do Minho

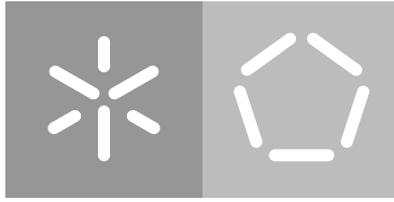
Escola de Engenharia

Departamento de Informática

Carlos Miguel Cerqueira Silva Lopes

UMA ARQUITETURA PARA IMPLEMENTAÇÃO NG-PON2

January 2019



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Departamento de Informática

Carlos Miguel Cerqueira Silva Lopes

UMA ARQUITETURA PARA IMPLEMENTAÇÃO NG-PON2

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Informática

Dissertação Orientada por
Prof. Dr. Pedro Nuno Sousa
Supervisor na Empresa
Eng.º. Miguel Neto Gonçalves

January 2019

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação de mestrado é o resultado de muitas horas e dias de trabalho. A sua realização contou com apoios e incentivos, que sem os quais não se teria tornado uma realidade, e desde já aos quais estarei eternamente grato.

Ao Professor Doutor Pedro Nuno Miranda de Sousa, pela sua orientação, disponibilidade, total apoio e colaboração. Por todas as opiniões e críticas, pela enorme ajuda no solucionar de problemas e dúvidas que foram surgindo ao longo da realização desta dissertação.

Ao Engenheiro Miguel Neto Gonçalves, Engenheiro Pedro Matos, Engenheiro Manuel Jerónimo e todos do departamento de Desenvolvimento e Implementação de Sistemas de Rede da Altice Labs, pois sem a sua integração, guia e partilha de conhecimentos, não seria possível a realização deste trabalho. Um agradecimento também a todo o grupo de estagiários, pela integração, companhia, total apoio e companheirismo.

A todos os meus amigos e ao meu irmão, também um amigo. Pelo apoio, força, compreensão mas sobretudo pela amizade.

E como os últimos são sempre os primeiros, dirijo um agradecimento especial aos meus pais. Por serem modelos de coragem, pelo apoio incondicional, incentivo, paciência, pelos sacrifícios cometidos de forma a ser possível atingir esta meta na minha vida académica. Aos meus pais dedico este trabalho!

ABSTRACT

Due to the high appearing of many bandwidth consumer services, as well as the increase of the bandwidth consumed by those services, on the last decade the PON (Passive Optical Network) architectures and the FTTx (Fiber To The Place) concept forcibly evolved, enabling larger disponibility on data rates to the costumer and to the services.

There are many PON standards today, for example EPON (Ethernet Passive Optical Network), BPON (Broadband Passive Optical Network), GPON (Gigabit Passive Optical Network) and XG-PON (10 Gbps PON). Although having these technologies, the idea that PON have unlimited capacity is erroneous, although, even limited, it can be much higher than the capacity available today by the copper network. Given the architectural options, implementation schemes, performance of some equipment, gradual requirements by customers and services, the biggest problems will be spectral austerity/lack and the need to supply customers with an even broader data and service rate , higher than 10 Gbps (provided by XG-PON), and as a consequence, these solutions can be seen as short to medium term.

In the wake of these developments, a possible long-term solution to address these shortcomings is a development standard entitled NG-PON2 (Next-Generation PON 2).

This work has as main objective the proposal of an architecture of implementation NG-PON2 oriented to the Central Office, being a solution with applicability in the access networks. In parallel, the NG-PON2 and previous ones will be studied. It will also make a characterization of current architectures and technologies. The work will also integrate the construction of a real NG-PON2 scenario, encompassing the necessary tests. All this work, from study, architecture design, implementation and testing will be developed at the company Altice Labs, S.A. in Aveiro.

RESUMO

Devido à elevada multiplicação de diferenciados serviços de consumo de largura de banda, bem como o aumento de banda que estes serviços consomem, as arquiteturas de rede PON e o conceito de FTTx evoluíram forçosamente na última década, facultando ao cliente e aos serviços maior disponibilidade em taxas de dados.

Existem várias normas PON em uso nos dias de hoje, como por exemplo: EPON, BPON, GPON e XG-PON. Ainda que dispondo destas tecnologias, a ideia que as PON têm capacidade ilimitada é errónea, apesar de que, mesmo limitada consegue ser muitíssimo superior à capacidade disponível atualmente pela rede de cobre. Face a opções de arquitetura, esquemas de implementação, desempenho de alguns equipamentos, exigências graduais por parte dos clientes e serviços, os maiores problemas serão a austeridade/carência espectral e a necessidade de abastecer os clientes com uma taxa de dados e serviços ainda mais ampla, superior aos 10 Gbps (fornecido pelo XG-PON). Como consequência, estas soluções podem ser encaradas como sendo de curto a médio prazo.

No seguimento destes acontecimentos, uma possível solução a longo prazo que visa colmatar estas deficiências será uma norma em desenvolvimento, denominada por NG-PON2.

Este trabalho tem como principal objetivo a proposta de uma arquitetura de implementação NG-PON2 orientado à *Central Office*, sendo uma solução com aplicabilidade nas redes de acesso. Em paralelo será estudada a norma NG-PON2 e outras anteriores. Será também feita uma caracterização de arquiteturas e tecnologias atuais. O trabalho integrará igualmente a construção de um cenário real NG-PON2, englobando os testes necessários. Todo este trabalho, desde estudo, especificação da arquitetura, implementação e testes será desenvolvido na empresa Altice Labs, S.A. em Aveiro.

CONTEÚDO

Agradecimentos	iii
Abstract	v
Resumo	vii
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Acrónimos	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização da Dissertação	4
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 Fiber To The Place	5
2.1.1 Conceito de Fiber To The Place	5
2.1.2 Rede FTTH	7
2.1.3 Orçamento de energia e orçamento de atenuação	9
2.2 Redes Óticas Passivas - GPON e XG-PON	10
2.3 NG-PON2	14
2.3.1 Requisitos	15
2.3.2 Definição	16
2.3.3 TWDM-PON	18
2.3.4 Protocolo ICTP	22
2.3.5 Outros protocolos	23
2.3.6 Cenário de Serviços	23
3 ESPECIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA	27
3.1 Cenário GPON	27
3.1.1 Descrição	27
3.1.2 Componentes	27
3.1.3 Configurações do cenário	31
3.2 Cenário NG-PON2	32
3.2.1 Descrição	32
3.2.2 Componentes	33
3.2.3 Configurações do cenário	34
3.3 Cenário Híbrido	35

3.3.1	Descrição	35
3.3.2	Componentes	36
3.3.3	Configurações do cenário	37
4	EQUIPAMENTOS E TESTES EFETUADOS	39
4.1	Equipamento UX400	39
4.2	Teste de Throughput	40
4.3	Testes segundo o RFC 2544	43
5	RESULTADOS	47
5.1	Resultados Throughput	47
5.1.1	Cenário GPON	47
5.1.2	Cenário NG-PON2	51
5.1.3	Cenário Híbrido	54
5.1.4	Considerações Adicionais	57
5.2	Resultados RFC 2544	58
5.2.1	Teste de Latência	58
5.2.2	Teste de Jitter	60
5.2.3	Teste de Perda de Tramas	62
5.2.4	Teste de Burst	63
6	CONCLUSÃO	67
6.1	Conclusões	67
6.2	Trabalho Futuro	68
	Bibliografia	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Estimativa do tráfego global IP entre 2016 e 2021 [1]	2
Figura 2	Diferentes arquiteturas FTTx	6
Figura 3	Topologia P2M vs P2P [2]	8
Figura 4	Margens de orçamento de energia	9
Figura 5	Arquitetura PON simples (ODN) [3]	10
Figura 6	Espetro de luz relacionado com cada tecnologia PON [4]	12
Figura 7	Evolução das normas ITU-T [5]	13
Figura 8	<i>Framing</i> da camada GTC [6]	14
Figura 9	Cenário básico NG-PON2 [7]	16
Figura 10	Ajuste de onda de TWDM PON [8]	17
Figura 11	Cenário TWDM PON com múltiplas OLTs para LLU [9]	20
Figura 12	Banda de comprimento de onda TWDM-PON com a reutilização das bandas NG-PON existentes [10]	21
Figura 13	Banda de comprimento de onda TWDM-PON com uso da banda C (se as bandas XG-PON forem usadas, sem uma sobreposição de vídeo presente) [10]	21
Figura 14	Banda de comprimento de onda TWDM-PON com uso de bandas C e L com sobreposição de vídeo, mas não XG-PON.[10]	22
Figura 15	Cenários de serviço da OLT [11]	24
Figura 16	Suporte para a provisão de serviços da OLT [12]	25
Figura 17	Esquema cenário GPON	28
Figura 18	OLT1T1 [13]	28
Figura 19	CXO160G [13]	29
Figura 20	TG16G [13]	29
Figura 21	SFP GPON Bx [14]	30
Figura 22	ONT SFU [15]	31
Figura 23	Cenário GPON com interfaces de rede	31
Figura 24	Esquema de potência ótica	32
Figura 25	Esquema da multiplexagem de quatro comprimentos de onda	32
Figura 26	Cenário base NG-PON2	33
Figura 27	TT04SXG	33
Figura 28	NG-PON2 ONT-SFU	34
Figura 29	Cenário NG-PON2 com interfaces de rede	35

Figura 30	Topologia de coexistência	36
Figura 31	Topologia do teste de carga para o cenário GPON	40
Figura 32	Topologia do teste de carga para o cenário NG-PON2	40
Figura 33	Topologia do teste de carga para o cenário híbrido	41
Figura 34	Cabeçalho <i>downstream</i> do teste GPON	42
Figura 35	Cabeçalho <i>upstream</i> do teste GPON	42
Figura 36	Taxa de tramas da <i>Stream 1</i>	49
Figura 37	Taxa de tramas da <i>Stream 2</i>	50
Figura 38	Cenário GPON com taxas de débito representadas	51
Figura 39	Taxa de dados para a <i>stream 1</i>	56
Figura 40	Taxa de dados para a <i>stream 2</i>	56
Figura 41	Latência vs tamanho de tramas para a OLT	59
Figura 42	Latência vs tamanho de tramas para NG-PON2	59
Figura 43	Latência vs tamanho de tramas para GPON	60
Figura 44	<i>Jitter</i> vs tamanho de tramas para a OLT	61
Figura 45	<i>Jitter</i> vs tamanho de tramas para NG-PON2	61
Figura 46	<i>Jitter</i> vs tamanho de tramas para GPON	62
Figura 47	Perda de tramas vs taxa para a OLT	63
Figura 48	Perda de tramas vs taxa para NG-PON2	63
Figura 49	Perda de tramas vs taxa para GPON	64
Figura 50	Cenário NG-PON2 a desenvolver em trabalho futuro	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Perdas nos caminhos óticos (Classes ODN) [16; 17]	17
Tabela 2	Distâncias de Fibra (Classes ODN) [16; 17]	17
Tabela 3	Tempo de sintonização dos canais Tx/Rx	18
Tabela 4	Normas PON internacionais [5]	19
Tabela 5	Cabeçalho do pacote de <i>throughput downstream</i> GPON	41
Tabela 6	Cabeçalho do pacote de <i>throughput upstream</i> GPON	42
Tabela 7	Configurações de <i>threshold</i> RFC 2544	45
Tabela 8	Configurações de <i>throughput</i> RFC 2544	45
Tabela 9	Configurações de latência RFC 2544	45
Tabela 10	Configurações de perda de tramas RFC 2544	45
Tabela 11	Configurações de <i>burst</i> RFC 2544	45
Tabela 12	Resultado Agregado OLT	47
Tabela 13	Tramas recebidas	48
Tabela 14	Resultado do atraso por <i>stream</i>	48
Tabela 15	Resultados da taxa por cada <i>stream</i>	48
Tabela 16	Sumário de Resultados <i>Stream 1</i>	49
Tabela 17	Sumário de Resultados <i>Stream 2</i>	49
Tabela 18	Sumário de Resultados <i>Stream 1</i>	50
Tabela 19	Sumário de Resultados <i>Stream 2</i>	51
Tabela 20	Sumário de Resultados NG-PON2 OLT	52
Tabela 21	Tramas recebidas	52
Tabela 22	Resultado do atraso	53
Tabela 23	Sumário de Resultados NG-PON2 ONT	53
Tabela 24	Tramas recebidas	53
Tabela 25	Resultado do atraso	54
Tabela 26	Sumário de Resultados Agregado do Cenário híbrido OLT	54
Tabela 27	Tramas recebidas	55
Tabela 28	Sumário de Resultados do Cenário híbrido OLT <i>Stream 1</i>	55
Tabela 29	Resultado das taxas do cenário híbrido OLT <i>stream 1</i>	55
Tabela 30	Sumário de Resultados do Cenário híbrido OLT <i>Stream 2</i>	55
Tabela 31	Resultado das taxas do cenário híbrido OLT <i>stream 2</i>	56
Tabela 32	Sumário de Resultados do Cenário híbrido ONT NG-PON2	57
Tabela 33	Resultado das taxas do cenário híbrido ONT NG-PON2	57

Tabela 34	Sumário de Resultados Cenário híbrido ONT GPON	57
Tabela 35	Resultado das taxas do cenário híbrido ONT GPON	58
Tabela 36	Sumário do teste de latência para a OLT	59
Tabela 37	Sumário do teste de latência para NG-PON2	60
Tabela 38	Sumário do teste de latência para GPON	60
Tabela 39	Sumário do teste de <i>jitter</i> para a OLT	61
Tabela 40	Sumário do teste de <i>jitter</i> para NG-PON2	61
Tabela 41	Sumário do teste de <i>jitter</i> para GPON	62
Tabela 42	Sumário do teste de perda de tramas para a OLT	62
Tabela 43	Sumário do teste de perda de tramas para NG-PON2	63
Tabela 44	Sumário do teste de perda de tramas para GPON	64
Tabela 45	Sumário do teste de <i>burst</i> para a OLT	64
Tabela 46	Tabela de registos para o teste de <i>burst</i> da OLT	65
Tabela 47	Sumário do teste de <i>burst</i> para NG-PON2	65
Tabela 48	Tabela de registos para o teste de <i>burst</i> para NG-PON2	65
Tabela 49	Sumário do teste de <i>burst</i> para GPON	66
Tabela 50	Tabela de registos para o teste de <i>burst</i> para GPON	66

LISTA DE ACRÓNIMOS

A

ATM Asynchronous Transfer Mode

B

BPON Broadband Passive Optical Network

C

C-TAG Client TAG

CAPEX Capital Expenditure

CATV Community Antenna Television

CT Channel Termination

D

D₂D Device-to-Device

DBA Dynamic Bandwidth Allocation

DBR Distributed Bragg Reflector Laser

DFB Distributed Feedback Laser

DSCP Differentiated Services Code Point

DTH Direct To Home

DWBA Dynamic Wavelength and Bandwidth Allocation

DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing

E

EB Exabytes

ECL External Cavity Laser

EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier

EPON Ethernet Passive Optical Network

EVC Ethernet Virtual Connection

F

FP Fabry-Perot filter

FSAN Full Service Access Network

FTTB Fiber To The Building

FTTC Fiber To The Curb

FTTH Fiber To The Home

FTTN Fiber To The Node

FTTX Fiber To The Place

G

GEM GPON Encapsulation Method

GPON Gigabit Passive Optical Network

GTC GPON Transmission Convergence

H

HDTV High-Definition Television

HSI High Speed Internet

I

ICTP Inter-Channel-Termination Protocol

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IGMP Internet Group Management Protocol

IP Internet Protocol

IPTV Internet Protocol Television

ISP Internet Service Provider

ITU-T International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector

L

LACP Link Aggregation Control Protocol

LAN Local Area Network

LLU Local Loop Unbundling

M

M2M Machine-to-Machine

MAC Media Access Control

MDU Multi Dwelling Unit

MEI Mestrado em Engenharia Informática

MPLS Multiprotocol Label Switching

N

NGA Next Generation Access

NGPON₂ Next-Generation Passive Optical Network 2

NNI Network-Network Interface

NTP Network Time Protocol

O

OA Optic Amplifier

OAM Operations, Administration and Maintenance

OAN Optical Access Network

ODN Optical Distribution Network

OLT Optical Line Termination

OMCI ONU Management and Control Interface

ONT Optical Network Termination

ONU Optical Network Unit

OPEX Operational Expenditure

OTDR Optical Time Domain Reflectometers

P

P₂M Point-to-Multipoint

P₂P Point-to-Point

PCBD Physical Control Block downstream

PDH Plesiochronous Digital Hierarchy

PLOAM Physical Layer Operations, Administration and Maintenance

PLOU Physical Layer Overhead upstream

PON Passive Optical Network

PRBS Pseudorandom Binary Sequence

PTP Precision Time Protocol

Q

QoS Quality of Service

R

RSSI Received signal strength indication

RTT Round Trip Time

S

S-TAG Service TAG

SDH Synchronous Digital Hierarchy

SFP Small Form-factor Pluggable Transceiver

SFU Single Family Unit

SIP Session Initiation Protocol

SONET Synchronous Optical Networking

T

TC Transmission Convergence

TDM Time Division Multiplexing

TDMA Time Division Multiple Access

TOIP Telephony over IP

TOS Type of Service

TWDM-PON Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network

U

UDP User Datagram Protocol

UHD Ultra High Definition

UM Universidade do Minho

UNI User-Network Interface

UTP Unshielded Twisted Pair

V

VOIP Voice over IP

W

WDM Wavelength-Division Multiplex

WIMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access

WMM Wavelength Mobility Manager

X

XG-PON 10 Gigabit Passive Optical Network

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

É um facto inegável que hoje em dia a *Internet* é usada para quase tudo na vida humana. A maioria dos serviços e atividades do nosso quotidiano, por exemplo o caso da televisão, telefone, jogos eletrónicos, cursos digitais, música, aluguer de filmes, antes chegavam até nós de diferentes formas, mais primitivas. Hoje em dia, há a possibilidade de fazer uso destes serviços, e muito mais, através da rede. Serviços estes que fazem uso massivo de largura de banda, como é o caso por exemplo da HDTV (*High-Definition Television*), que requer cerca de 20 Mbps por canal.

Conforme estes serviços que já estão totalmente integrados na rede, outros tenderão também a ser adaptados e protocolizados para funcionarem pela mesma via, devido a possibilitar a facilidade de transmissão e capacidade do fornecimento de serviços com melhor qualidade. Desta forma, estes fatores irão contribuir significativamente para a necessidade de largura de banda. De frisar também o papel das operadoras de telecomunicações, que em função de obter maiores lucros, oferecem variados serviços deste tipo, rentabilizando os seus recursos [18].

Neste contexto, a solução encontrada, que se tem revelado a mais acertada, é o uso das tecnologias PON (*Passive Optical Network*), devido à elevada largura de banda, baixa atenuação, maior capacidade e velocidade, entre outras vantagens, como o custo face a outras tecnologias.

Nos últimos anos houve um avanço enorme na área das tecnologias PON. Várias tecnologias PON em estudo foram normalizadas, no âmbito do IEEE 802.3 (*Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards*), ITU-T (*International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*) e FSAN (*Full Service Access Network*). Exemplos dessas normas usadas hoje em dia são o GPON (*Gigabit Passive Optical Network*), NGPON₁ (XG-PON) (10 Gbps PON) e NG-PON₂ (*Next-Generation PON 2*) [19]. Devido a este avanço, o termo FTTx (*Fiber To The Place*) foi ganhando ênfase, pondo fim ao futuro das tradicionais redes com fio cobre, usadas até aos dias de hoje. O crescimento das redes de acesso é contínuo e abrangente em todo o planeta, tornando-se algo indispensável no dia-a-dia de milhares de

IP Traffic, 2016–2021							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	CAGR 2016–2021
By Type (Petabytes [PB] per Month)							
Fixed Internet	65,942	83,371	102,960	127,008	155,121	187,386	23%
Managed IP	22,911	27,140	31,304	35,226	38,908	42,452	13%
Mobile data	7,201	11,183	16,646	24,220	34,382	48,270	46%
By Segment (PB per Month)							
Consumer	78,250	99,777	124,689	154,935	190,474	232,655	24%
Business	17,804	21,917	26,220	31,518	37,937	45,452	21%
By Geography (PB per Month)							
Asia Pacific	33,505	43,169	54,402	68,764	86,068	107,655	26%
North America	33,648	42,267	51,722	62,330	73,741	85,047	20%
Western Europe	14,014	17,396	21,167	25,710	30,971	37,393	22%
Central and Eastern Europe	6,210	7,451	8,940	11,016	13,781	17,059	22%
Middle East and Africa	2,679	3,910	5,538	7,773	10,941	15,490	42%
Latin America	5,999	7,502	9,141	10,861	12,909	15,464	21%
Total (PB per Month)							
Total IP traffic	96,054	121,694	150,910	186,453	228,411	278,108	24%

Figura 1: Estimativa do tráfego global IP entre 2016 e 2021 [1]

cidadãos, e que no futuro, previsões apontam a que não só esse crescimento continue, mas com ainda maiores e mais completas ligações, menores atrasos e largura de banda maior. Prova disso é que, tomando o exemplo da contratação de serviços de Internet, a banda larga aumenta cerca de 20% por ano, e o incentivo reside em mais transmissões de vídeo, *cloud computing*, *big data*, *social media* e na entrega de dados móveis. Em 2020, prevê-se que esteja disponível a última melhoria em vídeos de alta definição, 8k UHD (*Ultra High Definition*), sendo que a estimativa de tráfego de vídeo, em sistemas móveis e fixos, seja de 2600 vezes superior ao de 2010 [20]. Quanto aos dados móveis, os assinantes globais de dados móveis aumentaram em cerca de 35% por ano, estimando-se que ultrapassem os 7,5 milhares de milhão em 2019 (no primeiro trimestre de 2014 o número rondava os 2,3 milhares de milhão) [21]. Este aumento irá dever-se também a novos tipos de serviço de comunicação, como serviços de proximidade, comunicações D2D (*Device-to-device*) e M2M (*Machine-to-machine*).

Como mostra a Figura 1, o tráfego global de IP em 2016 é de 96 EB (*Exabytes*) (cerca de 27033.6 *Exabits*) por mês e quase triplicará em 2021, atingindo 278 EB por mês. O tráfego IP do consumidor atingirá 232,7 EB por mês e o tráfego IP comercial será de 45,5 EB por mês até 2021.

Entretanto, as tecnologias PON em uso deixarão de suportar as necessidades da largura de banda exigidas, existindo então duas soluções a médio e longo prazo, NG-PON₁ e NG-

PON2, respetivamente [22; 23; 24; 25], sendo o foco deste trabalho a solução de longo prazo, NG-PON2.

No contexto deste trabalho, a oportunidade de poder colaborar com a Altice Labs, a maior empresa a nível nacional no campo da investigação e inovação de serviços digitais e pioneira no estudo e desenvolvimento de NG-PON2, é bastante vantajoso. Empresa esta que pertence a um dos maiores grupos do mundo na área das telecomunicações. O estudo detalhado desta tecnologia e de tecnologias de legado, irá contribuir para o desenvolvimento de uma nova solução NG-PON2.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como principal objetivo a criação e apresentação de uma nova solução arquitetural NG-PON2 a ser implementada em *Central Office* (Central de alimentação de fibra ótica, localizada na parte terminal de uma rede PON, nomeadamente nas redes de telecomunicações pertencentes à Altice Portugal).

Esta solução poderá ser mais tarde integrada na rede de fibra que alimenta os clientes residenciais da MEO, bem como algumas soluções feitas à medida pela Altice Labs, S.A. para determinados clientes e empresas.

Esta proposta pretende ir de encontro com objetivos tais como: conseguir a integração desta solução NG-PON2 com tecnologias mais antigas sem problemas de coexistência (como falhas de serviço ou custos de adaptativos), a otimização de todos os recursos disponíveis, obter acessos superiores sem congestão, com maior densidade. Para que tudo isto se concretize, é necessário definir certos objetivos parcelares:

- Investigação e levantamento inicial bibliográfico sobre todos os termos em estudo, desde o conceito de redes PON, tecnologias associadas, recolha de vários documentos relacionados com a área.
- Acompanhamento de uma equipa na instalação de equipamento da tecnologia anterior, GPON, da rede MEO, para maior familiarização com as redes PON e seus componentes.
- Caracterização e análise da tecnologia NG-PON2;
- Definição e estruturação da solução a ser apresentada;
- Implementação da solução em cenário real;
- Realização de testes, análise de desempenho, comparação com outras soluções e correção de possíveis erros;

4 Capítulo 1. introdução

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada por capítulos, sendo dividida respetivamente em seis capítulos:

- **Introdução:** este capítulo faz o enquadramento, contextualização e motivação do trabalho ao apresentar o tema geral e os objetivos a desenvolver;
- **Estado da Arte:** aborda a base teórica que irá permitir a especificação e a implementação de uma nova solução NG-PON2. Será descrita a noção de redes PON, normas anteriores, e todo o impulso originário do NG-PON2;
- **Especificação da Solução Proposta:** aborda todo o trabalho desenvolvido, diferentes cenários desenvolvidos, caracterização dos componentes em uso, até à arquitetura conseguida. Igualmente será detalhado o seu funcionamento;
- **Equipamentos e Testes Efetuados:** neste capítulo são apresentados e descritos os testes efetuados nos cenários desenvolvidos, assim como os equipamentos utilizados nos testes;
- **Resultados:** serão apresentados os resultados conseguidos, em ambos os testes para os diferentes cenários. O objetivo será a análise dos mesmos, comparativamente entre cenários;
- **Conclusões:** neste último capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas de todo o trabalho. É realizada uma análise de todos os capítulos e as principais contribuições desta dissertação. Por fim, poderão ser expostas algumas das futuras melhorias a ser efetuadas na solução proposta.

ESTADO DA ARTE

Neste capítulo será descrito todo o estado da arte relacionado com as OAN (*Optical Access Network*). Na secção 2.1 será explicado o conceito arquitetural FTTx. Na secção 2.2 será feito um resumo da evolução das redes PON e tecnologias de legado. Na secção 2.3, entrando no tema principal deste trabalho, será feita a definição da tecnologia NG-PON2, requisitos, impulsos, propriedades e serviços disponíveis neste tipo de tecnologia.

2.1 FIBER TO THE PLACE

2.1.1 *Conceito de Fiber To The Place*

Na atualidade, a implementação das OAN representa um dos desafios tecnológicos mais importantes para as entidades da área das telecomunicações. Já foram planeados grandes investimentos para a substituição parcial ou total das redes tradicionais de acesso, à base de cobre, que continuam a ser um bem precioso para operadoras mais antigas no mundo das telecomunicações, mas ao mesmo tempo, são uma entrave na providência de serviços de banda larga para clientes residenciais e comerciais.

Em resposta a esta conjuntura, foram definidos planos nacionais e internacionais para introduzir as OANs, com metas bem definidas. Em 2009, os Estados Unidos criaram o programa "*Connecting America: The National Broadband Plan*", em que a meta seria fornecer ligações de 100 Mbps *downstream* e 50 Mbps *upstream* para cerca de 100 milhões de clientes residenciais e ligações de 1 Gbps para comunidades locais até 2020. Em 2010, a União Europeia estabeleceu como um dos principais objetivos da "*Digital Agenda*", que até 2020 todos os cidadãos europeus deveriam ter acessos de banda larga acima dos 30 Mbps e a maior parte acima de 100 Mbps [26]. Nos últimos anos, várias abordagens foram criadas para implantar NGA (*Next Generation Access*).

FTTx é o termo geral utilizado para designar uma arquitetura rede de banda larga, que se propaga no meio ótico. As soluções FTTx diferem mediante os vários pontos de terminação da fibra, provenientes do ODN (*Optical Distribution Network*) [27], como mostra a Figura 2. Nesta figura, são apresentadas as variantes FTTx normalmente utilizadas pelas operadoras

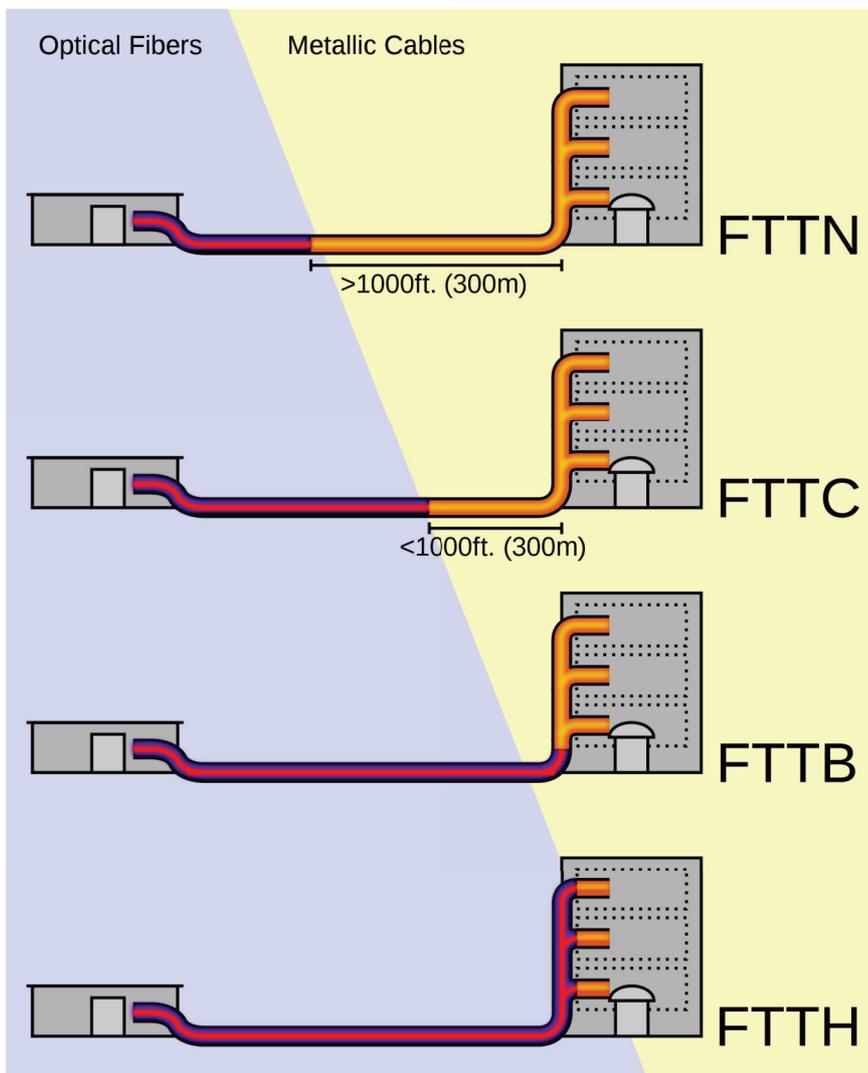


Figura 2: Diferentes arquiteturas FTTx

de telecomunicações:

- FTTN (*Fiber To The Node*) – ao sair da *central office*, a fibra liga a um armário de rua, com a ligação final desde aí até ao cliente sendo através cobre;
- FTTC (*Fiber To The Curb*) – a fibra vai até um armário na rua e a distribuição para os clientes naquela vizinhança tem como meio o cabo coaxial ou o par de cobre (menos distância em cobre que no FTTN).

- FTTB (*Fiber To The Building*) - a fibra vai até o prédio e a distribuição para os clientes é feita através de *Ethernet*.
- FTTH (*Fiber To The Home*) - a fibra vai até a residência do cliente, não utilizando antes qualquer tipo de meio senão fibra ótica, sendo apenas convertido para sinal elétrico no *gateway* residencial.

2.1.2 Rede FTTH

Como descrito anteriormente, a FTTH compõe uma rede de acesso baseada em fibra ótica, na qual liga um grande número de utilizadores finais à *Central Office*, também denominada como nó de acesso. Cada nó de acesso contém o equipamento eletrónico (ativo) de transmissão necessário para a fornecer as aplicações e serviços aos utilizadores finais. Estes nós de acesso, dentro de um município ou região, estão ligados a uma rede de fibra metropolitana ou urbana superior.

Este tipo de arquitetura de rede de acesso têm a capacidade de poder ligar vários serviços tais como transmissores fixos de rede sem fios, como por exemplo wireless LAN ou WiMAX, estações base de rede móvel, clientes com SFUs (*Single Family Unit*) e MDUs (*Multi Dwelling Unit*), infraestruturas de grandes dimensões como escolas, hospitais e grandes empresas [28]. Dentro deste tipo de arquitetura, conforme o tipo de localidade a implementar a rede, há dois tipos diferentes de classificação: *greenfield* e *brownfield*. *Greenfield* refere-se à instalação onde anteriormente não havia nenhuma tecnologia nova, em que a rede será instalada ao mesmo tempo que as infraestruturas, *brownfield* quando a instalação é feita em infraestruturas já existentes.

As principais influências na implementação de infraestruturas são o tipo de lugar, tamanho da rede, custo inicial da implementação da infraestrutura (CAPEX (*Capital Expenditure*)), custos de funcionamento da operação e manutenção da rede (OPEX (*Operational Expenditure*)), arquitetura de rede (por exemplo PON ou *Active Ethernet*), condições locais (por exemplo custos laborais locais), restrições de autoridades locais (controle de tráfego) e outros [29]. Os principais requisitos funcionais para uma rede FTTH incluem:

- Fornecimento de serviços e conteúdo com elevada largura de banda para cada cliente;
- Um projeto de uma arquitetura de rede flexível, com capacidade para atender às necessidades futuras;
- Conexão de fibra de cada cliente final diretamente ao equipamento ativo (nó de acesso), garantindo a máxima capacidade disponível para futuras exigências de serviço;
- Interrupção mínima durante a instalação da rede;

- Suporte para futuras atualizações de rede e expansão;

É importante referir a distinção entre as topologias utilizadas para a implementação das fibras (componentes passivos) e as tecnologias utilizadas para o transporte de dados sobre as fibras (componentes ativos). As duas topologias mais utilizadas são P2M (Ponto-Multiponto), tipicamente combinada com as PON e P2P (Ponto a ponto), que por norma usa tecnologias de transmissão *Ethernet* [2], como pode ser observado na Figura 3.

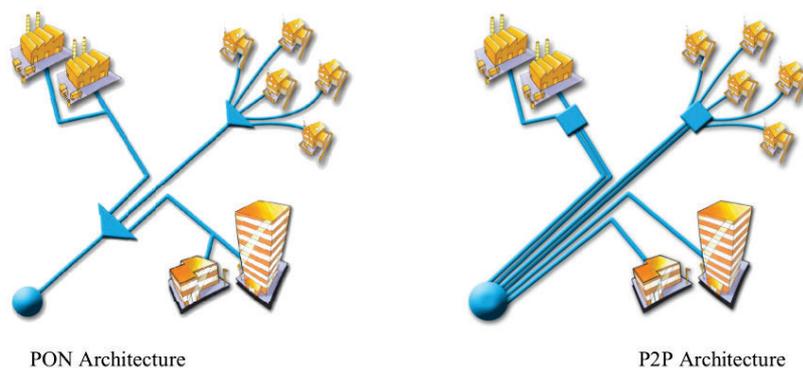


Figura 3: Topologia P2M vs P2P [2]

P2M - utiliza apenas uma fibra no transporte desde a *Central Office* até ao divisor ótico, e a partir daí pode seguir apenas numa fibra para cada cliente, ou até outro divisor (dependendo da razão de divisão utilizado). Os dados são codificados para que os clientes apenas recebam dados destinados a eles.

P2P - utiliza uma fibra para cada cliente na ligação à *Central Office*. A maioria das implementações usam *Ethernet*, e podem ser anexadas com outras técnicas de transmissão para aplicações (por exemplo SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*)/SONET (*Synchronous Optical Networking*)). Esta topologia também pode incluir tecnologias PON, colocando os divisores óticos passivos na *Central Office* [30].

Uma rede FTTH pode ser vista sob quatro camadas, rede passiva, rede ativa, serviços e utilizadores finais. Rede passiva diz respeito a todos os componentes passivos da rede, fibra ótica, divisores e conetores óticos. Rede ativa refere-se aos equipamentos ativos, ou neste caso eletrónicos, OLTs (*Optical Line Termination*), conversores, amplificadores óticos, cartas, bem como os sistemas operativos necessários [31]. Em conclusão, as redes FTTH têm, de longe, os melhores desempenhos, mesmo que sejam também as mais caras a serem instaladas. Sendo que a abertura da vala constitua o maior custo (cerca de 70%) para realizar infraestrutura subterrânea [32], os restantes custos (cerca de 30%) dependem das soluções tecnológicas escolhidas. Contudo, é de grande importância uma análise tecnológica e económica precisa para avaliar as vantagens e desvantagens de cada proposta de implementação, levando em consideração as despesas monetárias e operacionais [33].

2.1.3 Orçamento de energia e orçamento de atenuação

Todas as ligações de dados são limitadas pelo orçamento de energia. Orçamento de energia óptico é a atenuação mínima e máxima que uma ligação de fibra ótica deve ter entre o emissor e o recetor, para que seja garantida a potência mínima de receção. Conforme mostrado na Figura 4, a atenuação da instalação de cabos é apenas uma parte do orçamento de energia.

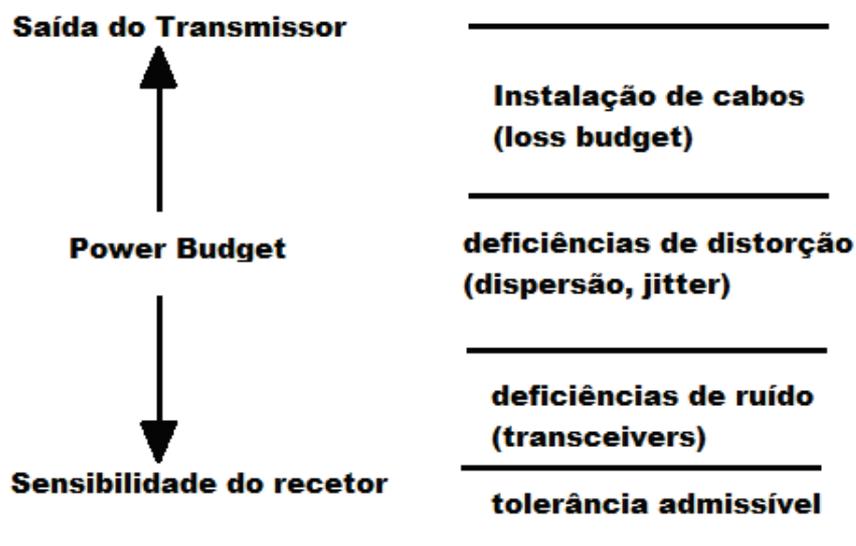


Figura 4: Margens de orçamento de energia

Orçamento de energia refere-se à quantidade de perda que uma ligação de fibra ótica (transmissor a recetor) pode tolerar para operar corretamente. O orçamento de energia tem um valor mínimo e máximo, o que significa que a ligação precisa ter um valor mínimo de perda para que não sature o recetor. Deve também ter um valor máximo de perda para garantir que o recetor tenha luz suficiente ou sinal com potência suficiente para operar normalmente.

O orçamento de atenuação é a quantidade de perda que a ligação de fibra ótica instalada deve ter. O orçamento de atenuação de uma ligação de fibra ótica é calculado adicionando as perdas de cabo de fibra ótica, que é determinado pelo comprimento de onda utilizado, e todos os componentes instalados ao longo da ligação.

2.2 REDES ÓTICAS PASSIVAS - GPON E XG-PON

As PON são as redes de acesso mais populares em todo o mundo. Em comparação com a capacidade de largura de banda de redes de cobre, a fibra possui uma largura de banda quase infinita.

Recentemente, a fibra ótica é cada vez mais aplicada em redes de acesso em vez de cobre, que drasticamente, diminui as despesas operacionais (OPEX) e aumenta o desempenho da rede. As tecnologias PON usam fibra ótica como meio de transmissão e dispositivos passivos através de toda a rede, reduzindo em grande número o custo de manutenção.

A ODN é composta por divisores óticos, caixas de distribuição de fibra, etc. Uma PON distribui e agrega o sinal a cada unidade de rede ótica/terminal de rede ótica (ONU/ONT) através de divisores de potência. A Figura 5 ilustra a arquitetura básica da tecnologia PON. Os principais componentes e dispositivos de uma rede PON são, a OLT, que normalmente está situada na *Central Office* da operadora, atuando como o início da topologia da rede de acesso, e ONUs (*Optical Network Unit*) ou ONTs (*Optical Network Termination*) no cliente final e um ODN [34]. A OLT liga o PON a redes superiores (metropolitanas), e a ONU serve

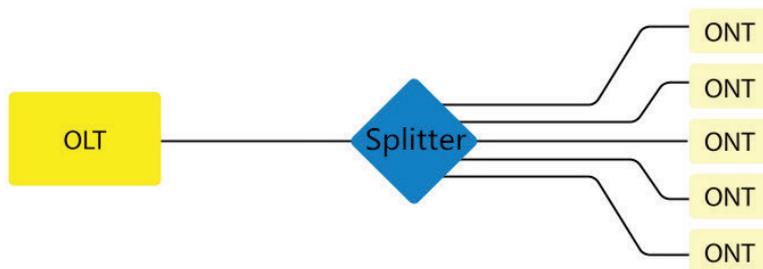


Figura 5: Arquitetura PON simples (ODN) [3]

como interface para o utilizador. O índice de divisão pode ir até 1 para 64, com valores de 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64. Na instalação real, segundo a norma, a distância máxima lógica entre OLT e ONT é 60 km. A distância máxima entre ONTs do mesmo porto PON, é 20 km, isto para GPON.

Diferentes tecnologias PON transmitem a taxas diferentes, incluindo 155 Mbps, 622 Mbps, 1,25 Gbps e 2,5 Gbps, até recentemente 40 Gbps. Por exemplo, o EPON tem uma taxa de dados simétrica de *upstream* e *downstream* de 1,25 Gbps, enquanto o GPON tem taxas de dados de fluxo *downstream* e *upstream* assimétricas, 2,5 e 1,25 Gbps respetivamente. Diferentes PONs também aplicam diferentes encapsulamentos de dados.

O ONU/ONT está localizado nas instalações dos utilizadores da rede. As suas funções são, fornecer interfaces óticas com a OLT, introduzir o sinal nas instalações do cliente e fornecer sinal elétrico, como *Ethernet* e vídeo. O ONU/ONT divide informações de vídeo,

dados e voz vindo da OLT e retransmite a informação para os equipamentos locais correspondentes. Enquanto isso, processa o sinal que sai do lado do cliente, transmitindo-o através de um canal *upstream* para a OLT.

A OLT possui duas funções básicas, o controle de serviços de clientes e a alocação dinâmica de largura de banda para as ONUs. Considerando que há até 64 ONUs, por cada porto PON, a usar o mesmo comprimento de onda, é necessário possuir métodos de acesso múltiplo para evitar conflitos entre as ONUs.

A maneira mais fácil é a utilização de técnicas TDMA (*Time Division Multiple Access*), que permite que cada cliente transmita e receba informações durante o intervalo de tempo atribuído. Tanto o EPON como o GPON utilizam TDMA para comunicação *upstream* sendo tecnologias categorizadas como TDM-PONs (*Time Division Multiplexing PON*).

Resultante da utilização de TDMA, é necessário fazer um uso mais eficaz da largura de banda, sendo o mecanismo eficiente para tal, a DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*). Quando um intervalo de tempo está vazio, é atribuído a outras ONUs que exigem mais largura de banda. O DBA é implementado na OLT de acordo com a prioridade dos clientes, QoS (Qualidade de Serviço) e a necessidade de largura de banda.

Para transmissão *downstream*, a OLT transmite os dados para todas as ONUs em *broadcast*. As ONUs recebem as informações transmitidas pela OLT, e cada ONU aceita ou descarta os dados, conforme o ID (identificador) no cabeçalho da trama. Para garantir a segurança e a privacidade das informações, todos os dados são encriptados.

Nos últimos quinze anos, o FSAN desenvolveu especificações técnicas que serviram de base para os padrões ITU-T. O BPON foi o primeiro padrão completo definido pela ITU-T em 2001 (reorganizado na ITU-T G.983.1 até G.983.5 em 2005) que tem origem no APON (ATM PON) e fornece entre 155,52 e 1244,16 Mbps de taxa *downstream* e *upstream* de 155,52 até 622,08 Mbps, com alcance disponível até 20 km e até 64 clientes finais [35]. Em 2004, o IEEE introduziu EPON, uma alternativa, que usa *Ethernet* como protocolo de transporte, em vez do protocolo de menor desempenho, fornecendo os simétricos 1,25 Gbps [36], tanto em *upstream* como *downstream*. Em 2009, evoluiu para 10G-EPON (IEEE 802.3av) tendo a capacidade de fornecer 10 Gbps *downstream* e 1 Gbps *upstream* [37]. Em resposta ao EPON, o ITU-T surgiu com o GPON. Este padrão, ITU-T G.984, foi introduzido em 2004 e encontrou um grande sucesso na Europa e América. Suporta várias opções de taxa de dados, mas geralmente fornece 2,5 Gbps de *downstream* e 1,25 Gbps *upstream*, com 30 km de alcance disponível e até 128 clientes finais [38]. Em 2010, o XG-PON [39] foi padronizado (ITU-T G.987) como a evolução natural do GPON, fornecendo uma taxa de *bits* de 10 Gbps *downstream* e *upstream* de 2,5/10 Gbps, com alcance disponível de 20 a 60 km e 64 a 128 clientes finais (o alcance disponível e o número de clientes finais são requisitos relacionados). GPON é a norma ITU-T G.984. Foi proposto pela FSAN em 2002. O FSAN projetou novas cama-

das, física e TC (*Transmission Convergence*), com base na arquitetura BPON e apresentou o padrão GPON.

O GPON utiliza uma única fibra para comprimentos de onda *upstream* e *downstream* com 1290-1330 nm e 1480-1500 nm, respectivamente (sendo utilizado 1310 nm para *upstream* e 1490 nm a *downstream*). E caso esta tecnologia seja aplicado a clientes residenciais, CATV (serviço de TV por cabo), será transmitido no comprimento de onda 1550 nm, Figura 6. A

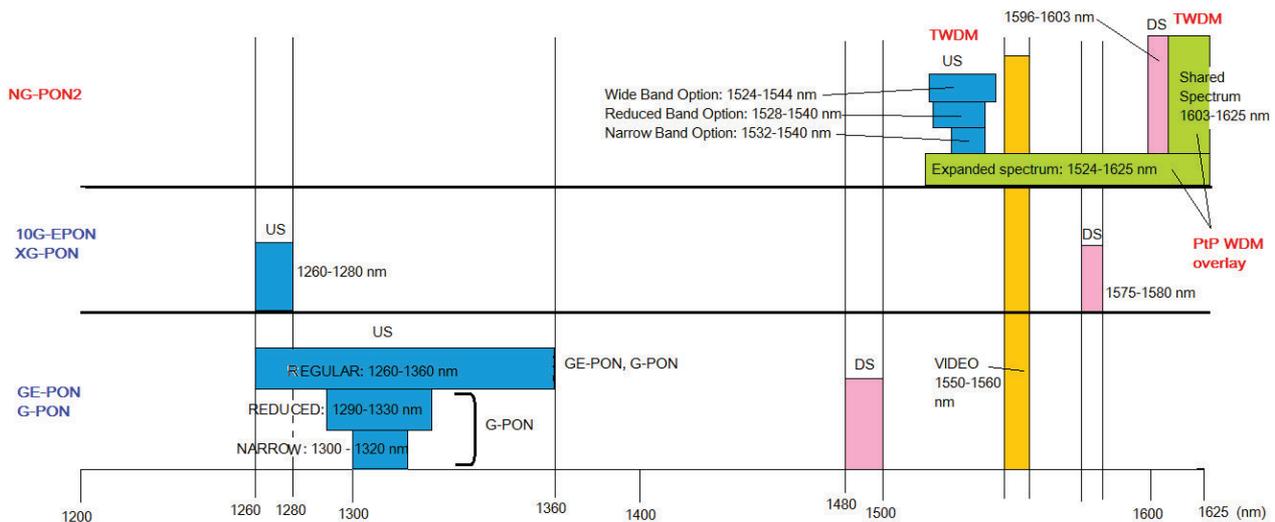


Figura 6: Espectro de luz relacionado com cada tecnologia PON [4]

interface PON pode suportar módulos óticos de Classe B+ e C+ [40].

A estrutura e as funções do sistema da OLT e do ONU são semelhantes ao EPON, com características adicionais abaixo indicadas [41]:

- Grande capacidade de suporte de serviço completo - o GPON é capaz de transportar tramas ATM e quadro de método de encapsulamento GPON GEM (*Encapsulation Method*), juntamente com voz, vídeo e PDH/SDH;
- A taxa de dados do GPON pode atingir 2,5 Gbps e teoricamente, cobrir uma distância de 60 km;
- Alocação de largura de banda flexível com garantia de QoS;
- Suporta de forma mais eficiente serviços TDM. O TDM pode ser mapeado para tramas GEM. As tramas TC do GPON também são de 125 μ s, que podem suportar diretamente TDM;
- Encapsulamento mais concreto e seguro. O GEM do GPON fornece um protocolo de encapsulamento flexível, que pode suportar o framing fixo e não fixo. Desta forma,

vários serviços podem ser mapeados em geral, sem transferência de protocolo. A eficiência de encapsulamento pode ser de até 94%.

- Tira maior proveito das capacidades OAM (*Operations, Administration and Maintenance*). O GPON fornece três tipos de canais OAM: canal OAM incorporado, PLOAM (OAM de camada física) e OMCI (interface de gestão e controle da ONT).
- Tecnologia complexa, e com custo maior do que o EPON. No entanto, à medida que o número de operadores utilizam GPON para implementar o FTTH, o custo do GPON diminui drasticamente e iguala o do EPON.

Juntamente com a implantação massiva da EPON e GPON em todo o mundo, as tecnologias PON de próxima geração também atraíram atenção significativa.

10G EPON e XG-PON são a atualização do EPON e GPON, que são desenvolvidos pelo IEEE e ITU-T, respetivamente. Tanto o 10G EPON quanto o XG-PON, suportam uma relação de divisão de 1:128 e podem fornecer mais de 100 Mbps de largura de banda para cada cliente. Tanto o 10G EPON como XG-PON pertencem ao TDM-PON. O *upstream* do TDM-PON funciona de forma *burst*. Quando a taxa de dados excede 10 Gbps, é muito difícil forjar fontes de laser a funcionar em modo *burst*. Ao procurar soluções da próxima geração de PON, Figura 7, é introduzida outra forma de método de multiplexagem, por WDM (*Wavelength-Division Multiplex*).

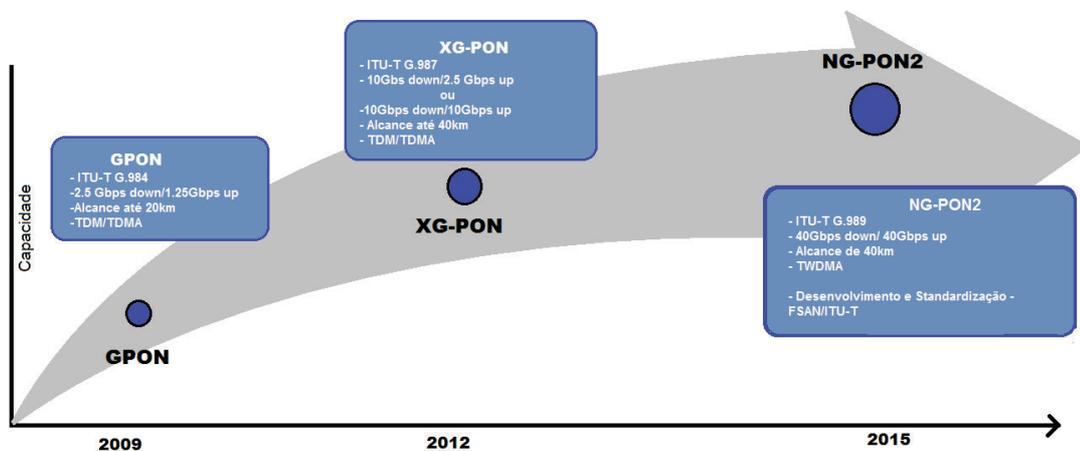


Figura 7: Evolução das normas ITU-T [5]

As tecnologias PON que utilizam o WDM incluem a multiplexagem por divisão de tempo e comprimento de onda, TWDM-PON (*Time and Wavelength Division Multiplexed PON*) e WDM-PON. O GPON usa o GEM, um método de encapsulamento de transporte de dados. Fornece um mecanismo orientado à ligação com framing de tamanho variável, para o transporte de serviços de dados. É independente do tipo da interface do serviço na OLT, bem como dos tipos de interfaces nos ONUs.

A trama GTC (GPON *Transmission Convergence*) downstream é composta por um bloco físico de controlo da direção, PCBd (*Physical Control Block downstream*) e a secção de carga GTC. A trama *upstream* é composta por múltiplos bursts transmitidos, em que cada um é uma secção PLOu (*Physical Layer Overhead upstream*) e um ou mais intervalos de alocações de largura de banda associadas a um Alloc-ID específico.

A trama downstream fornece uma referência de tempo comum para a PON e uma sinalização de controlo comum para o *upstream* [6]. A camada GTC está representada na Figura 8.

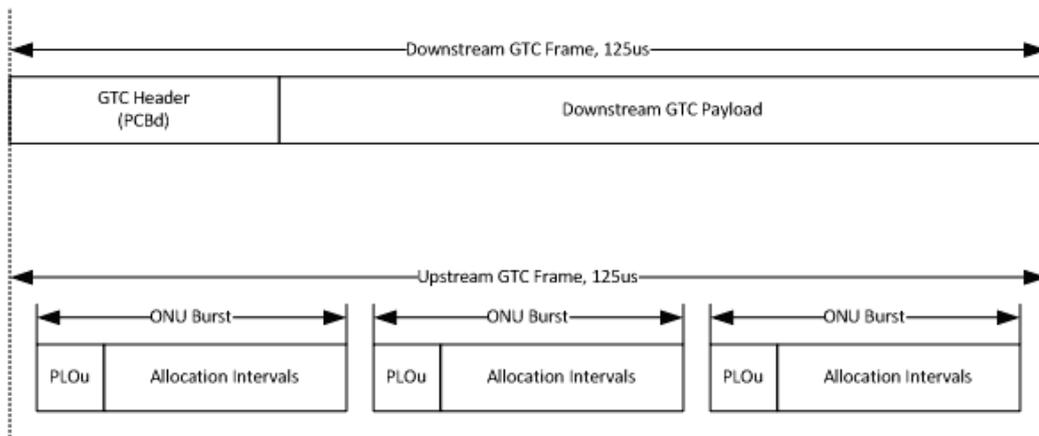


Figure 3. GTC Layer Framing

Figura 8: Framing da camada GTC [6]

2.3 NG-PON2

Uma nova norma está agora em fase de finalização, NG-PON2, representando uma grande mudança no paradigma das tecnologias anteriores [42]. O NG-PON2 baseia-se na série G.989 do ITU-T:

- ITU-T G.989.1 - redes óticas passivas com capacidade de 40 Gbps que contêm os requisitos gerais para NG-PON2;
- ITU-T G.989.2 - Especificação do meio físico dependente, que especifica parâmetros para a camada física como planos de comprimento de onda, orçamentos de perda ótica, taxas de linha, formato de modulação parâmetros do canal de comprimento de onda e classes de tempo de sintonização da ONU;
- ITU-T G.989.3 - Especificação da camada de convergência de transmissão;

- ITU-T G.989 - contém as definições, siglas, abreviaturas e convenções comuns da série G.989 de Recomendações.

2.3.1 Requisitos

Os requisitos principais do NG-PON2 são: o aumento da capacidade agregada por porto PON da OLT, largura de banda sustentável em qualquer unidade de rede ótica (ONU/ONT) com *downstream* de 1 Gbps e *upstream* de 0.5 Gbps até 1 Gbps, suportar 64 ou mais ONUs por porto, ser compatível com infraestruturas PON anteriores, permitir um alcance diferencial de 40 km e uma migração suave, por exemplo, coexistência com GPON, suporte para múltiplas aplicações na mesma ODN (residencial, empresarial, *backhaul*), testes embebidos, capacidades de diagnóstico e resiliência PON, incluindo dupla parentalidade [43].

O TWDM PON foi selecionada como a solução de tecnologia primária para NG-PON2 (em abril de 2012). Esta decisão baseou-se em considerações de custo do sistema, maturidade tecnológica, orçamento de perda, complexidade e consumo de energia. Existem várias aplicações que impulsionam a procura de PONs da próxima geração:

- FTTx para unidades de várias e grandes habitações;
- Empresas;
- Backhaul móvel;
- Fronthaul;
- Cloud-RAN.

Hoje em dia, o conteúdo é a principal exigência para o requisito de altas taxas de acesso. Conteúdo este que é mais do que a transmissão normal a que estamos acostumados, como a televisão e o VoD (*Video on Demand*). A aplicação nas redes móveis, serviços empresariais e M2M estão cada vez mais a ganhar atenção no campo das redes PON. A oportunidade *cloud* também é uma razão muito importante para evoluir para o NG-PON2:

- Os pacotes de *software* são transferidos de centros de dados;
- Os dados pessoais são hoje armazenados em centros de dados;
- São necessárias velocidades altas de envio e transferência, bem como simetria e baixa latência.

Desta forma, o NG-PON2 é um meio significativo capaz de uma entrega bem sucedida do serviço *cloud*. Desta forma, os ISPs (*Internet Service Providers*) precisam de preparar uma rede de acesso para o futuro, que inclui o provisionamento de vários segmentos e de diferentes recursos da *backhaul*. Podendo concluir-se que as futuras redes de acesso, deixarão

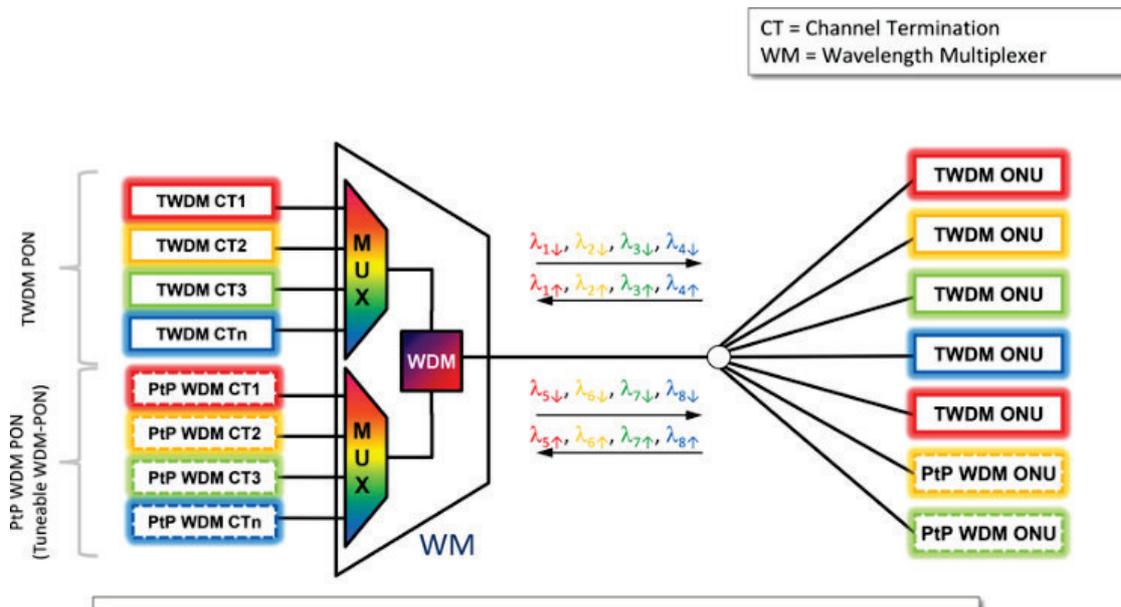


Figura 9: Cenário básico NG-PON2 [7]

de ser uma mera forma de poder aceder à Internet, mas sim, uma solução verdadeiramente multi-serviço.

2.3.2 Definição

O NG-PON2 é um sistema PON com comprimentos de onda múltiplos, com 40 Gbps de capacidade de banda larga [44], que pode crescer até aos 80 Gbps. Possui três de taxas de canal por cada porto: básica 10/2.5 Gbps, 10/10 Gbps e 2.5/2.5 Gbps. Os ONUs continuam incolores e podem sintonizar qualquer canal atribuído [45; 46; 47]. É possível observar na Figura 9 uma topologia básica NG-PON2, utilizando TWDM PON. Os canais *downstream* TWDM, na banda L, 1596-1603 nm, assentam-se entre o *downstream* XG-PON e o canal de monitorização OTDR (*Optical Time Domain Reflectometers*). Isso permite a coexistência simultânea com PONs antecessoras e *RF-Overlay* (video) de 1550 nm. Em *upstream*, os canais TWDM funcionam na banda C, 1524-1544 nm (banda ampla), 1528-1540 nm (banda reduzida) e 1532-1540 nm (banda estreita), acima do limite do filtro de coexistência (WDM) e abaixo do *RF-Overlay* (1550 nm). O uso da banda C permite ONUs de baixo custo [45; 46; 47]. Os vários comprimentos de onda enviados pelo ONU/ONT (*upstream*) variam conforme diferentes recursos do transmissor de forma a controlar o comprimento de onda, ou seja, banda ampla é definição feita no canal para que o laser DFB (*Distributed Feedback Laser*) varie sobre um maior alcance de comprimentos de onda. Banda estreita é mais apropriada para lasers controlados por temperatura, que bloqueiam o comprimento

de onda DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) atribuído (recebendo apenas esse comprimento de onda) [48]. É possível verificar a capacidade de sintonização dos comprimentos de onda feito pelo ONU/ONT num cenário NG-PON2 na Figura 10. O NG-PON2

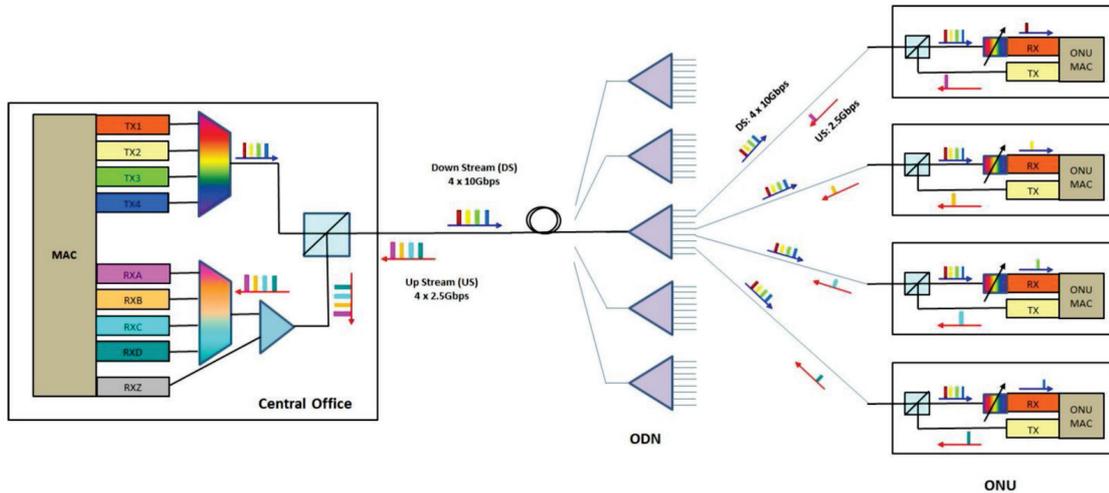


Figura 10: Ajuste de onda de TWDM PON [8]

é compatível com classes de perda do legado (anteriores), ou seja, B+ e C+ de GPON e N1, N2, E1, E2 de XG-PON1. Requer uma perda mínima do caminho óptico de 14 dB e permite um alcance diferencial de 40 km. As classes de perda de caminho óptico e distância de fibras são apresentadas nas Tabelas 1 e 2. Estão definidas três classes de Transmissores/Recetores

Classe	N1	N2	E1	E2
Perda Mínima (dB)	14	16	18	20
Perda Máxima (dB)	29	31	33	35
Perda no caminho diferencial óptico (dB)	15	15	15	15

Tabela 1: Perdas nos caminhos óticos (Classes ODN) [16; 17]

Distância da Fibra (Classe)	Mínimo (km)	Máximo (km)
DD20	0	20
DD40	0	40

Tabela 2: Distâncias de Fibra (Classes ODN) [16; 17]

de comprimentos de onda e tempo dos ONUs, baseadas em tecnologias conhecidas, Tabela 3.

- Classe 1 - Componentes podem incluir lasers comutados em *arrays*;
- Classe 2 - Componentes baseados em lasers eletrônicos (DBR);

- Classe 3 - Componentes podem ser DFB sintonizados termicamente.

Classe Tx/Rx	Tempo de sintonização
Classe 1	$<10 \mu\text{s}$
Classe 2	10 μs to 25 ms
Classe 3	25 ms to 1 s

Tabela 3: Tempo de sintonização dos canais Tx/Rx

Devido às capacidades do comprimento de onda TWDM-PON, é possível ter acesso a um conjunto de melhorias de rede que não existiam em gerações anteriores de TDM PON, nomeadamente:

- Aprimoramento progressivo de largura de banda (conceito de *Pay-as-you-Grow*);
- As portas da OLT são seletivas, podendo desta forma serem suspensas durante períodos baixos de tráfego para economia de energia, ou seja, durante tempos de baixa carga de tráfego, todas as ONUs podem retornar a um comprimento de onda comum e permitir que as portas OLT sejam desligadas;
- Capacidade de invulnerabilidade contra falhas por parte do transceiver da OLT, através do retorno da ONU, ou seja, todas as ONUs podem voltar a um modo de espera comum, ou comprimento de onda funcional, sob uma condição de falha para manter um serviço básico até que a falha seja apagada;
- Comprimento de onda rápido e dinâmico e atribuição de intervalo de tempo usando DWBA (*Dynamic Wavelength and Bandwidth Allocation*) para melhorar a eficiência de utilização da largura de banda;

A camada TC NG-PON2 possui novos recursos suportados pelo protocolo, como múltiplos comprimentos de onda, TWDM e canais P2P. A comunicação começa com um único canal, sendo posteriormente adicionados mais canais e CTs (*Channel Termination*) da OLT distribuídos que podem gerar uma única fibra.

2.3.3 TWDM-PON

O TWDM-PON é maioritariamente aceite como a principal solução de NG-PON2, que é uma junção de TDM-PON e WDM-PON. A arquitetura simples de TWDM PON é mostrada na Figura 10, em que são usados quatro pares de comprimentos de onda empilhados (pares de comprimento de onda (comprimento de onda transmitida/recebida) TX1/RXA; TX2/RXB; TX3/RXC; TX4/RXD). Esta multiplexagem pode ser feita com até 4 comprimentos de onda diferentes, sendo este cenário quando os comprimentos de onda pertencem

todos ao mesmo grupo dentro da OLT, e até 4 comprimentos de onda iguais, quando estas estão separadas em grupos individuais. Para propósitos de uma simples implementação e gestão de inventário, as ONUs estão equipadas com transmissores e recetores ajustáveis. O transmissor é ajustável a qualquer um dos quatro comprimentos de onda *upstream*. O recetor é ajustável a qualquer um dos quatro comprimentos de onda *downstream* [9].

Diferente do TWDM-PON, o WDM-PON utiliza a multiplexagem pura do comprimento de onda, tanto a *upstream* como para *downstream*.

Cada cliente final ocupa um comprimento de onda individual, o que pode fornecer segurança e largura de banda superiores. A estrutura também é simples, o que não requer protocolos P2M, apenas *Ethernet*. A tecnologia-chave do WDM-PON é um módulo ótico incolor no final do cliente. A atribuição de comprimento de onda fixa não é aceitável em instalações reais. O ONU deve ser uniforme, portanto, o módulo ótico tem que ser incolor. Há muitas maneiras de obter uma ótica incolor, como *self-seeded*, comprimento de onda ajustável e a reutilização do comprimento de onda. A seguinte Tabela 4 mostra as várias diferenças acerca das diferentes normas PON.

Tecnologia	Norma	Ano	<i>Downstream</i> [Gbps]	<i>Upstream</i> [Gbps]
BPON	ITU-T G.983.1 ÷ G.983.5	2001	≤ 1.25	≤ 0.625
EPON	IEEE 802.3ah	2004	1.25	1.25
10G EPON	IEEE 802.3av	2009	10	1
GPON	ITU-T G.984	2004	2.5	1.25
XG-PON	ITU-T G.987	2010	≤ 10	10
NG-PON2	ITU-T G.989	2013	40	10/40

Tabela 4: Normas PON internacionais [5]

Para obter um orçamento de energia superior ao de XG-PON, os OAs (*Optic Amplifier*) são usados no lado da OLT para aumentar os sinais *downstream*, bem como pré-amplificar os sinais *upstream*. A ODN permanece passiva desde que o OA e WDM sejam colocados no lado da OLT. As opções para a arquitetura base incluem mais pares de comprimentos de onda e diferentes taxas de empilhamento. No caso do TWDM PON, pode suportar oito pares de comprimentos de onda. Este tipo de sistema tem mais valor para soluções onde várias operadoras partilham uma infraestrutura de rede física. Outro exemplo é fornecer taxas GPON em cada par de comprimentos de onda [38]. Em comparação com tecnologias anteriores (por exemplo, XG-PON), o TWDM PON disponibiliza taxas mais altas tanto em *upstream* como *downstream*. A característica de múltiplos comprimentos de onda tem mais que uma aplicação, como por exemplo, *pay-as-you-grow*. O TWDM permite que inicialmente exista apenas um comprimento de onda aplicado e posteriormente sejam adicionados novos comprimentos de onda de forma a aumentar a capacidade do sistema, desta forma os operadores, conseguem direcionar a exigência do crescimento da largura de banda, investindo de forma necessária e precisa no que toca à sua procura. Outra aplicação do

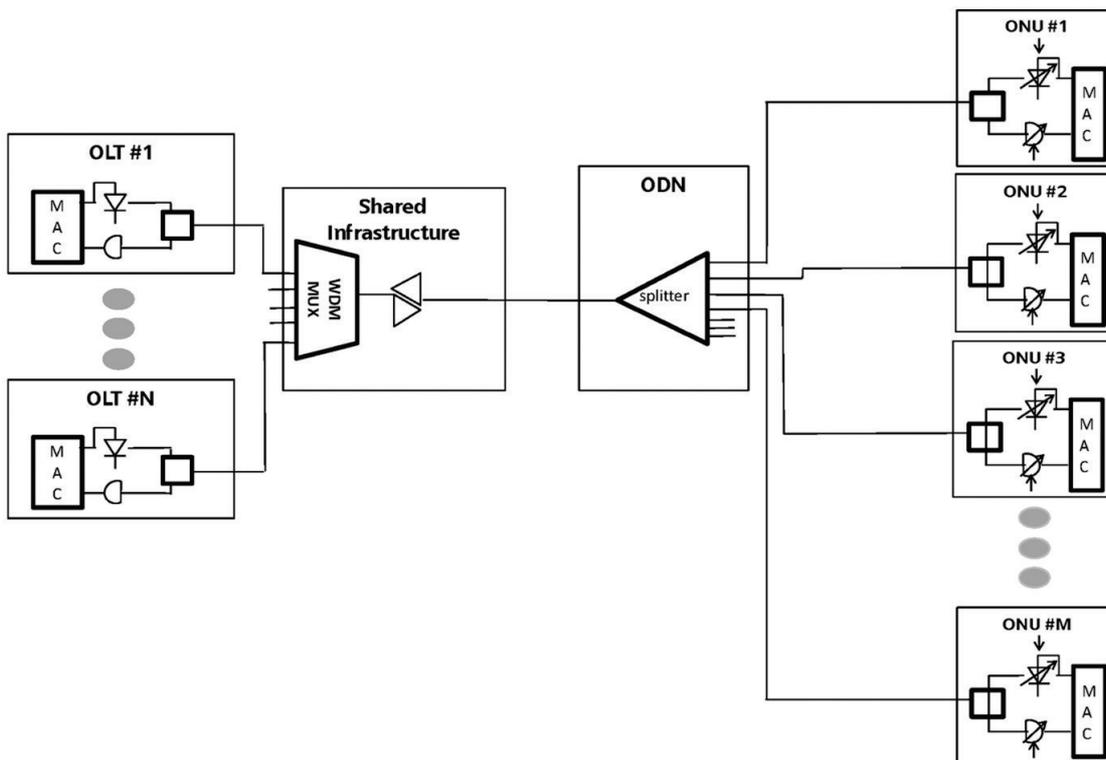


Figura 11: Cenário TWDM PON com múltiplas OLTs para LLU [9]

TWDM-PON é na desagregação do LLU (*Local Loop Unbundling*). Um TWDM-PON com várias OLT dispostas para o caso de LLU, é demonstrado na Figura 11. Cada operador possui o seu OLT, em que cada um contém um conjunto de canais de comprimento de onda. É usado um multiplexador para fundir as portas OLT numa única fibra. O dispositivo que seleciona o comprimento de onda pode ser tão simples como um desmultiplexador baseado em filtro. Em suma, este esquema delimita a infraestrutura geral partilhada para entre vários operadores. Oferece também a possibilidade do OLT de cada operador ser o mesmo, contendo todos os comprimentos de onda, e se necessitar, um determinado operador pode adicionar recursos à OLT. A coexistência com tecnologias anteriores PON depende unicamente do plano de comprimento de onda do TWDM PON, existindo várias opções para os comprimentos de onda TWDM PON.

A Figura 12 é referente à reutilização das bandas de comprimento de onda do XG-PON, pois estão definidas numa grelha mais estrita. Este plano de comprimento de onda potencia e influencia o trabalho de desenvolvimento na ótica do XG-PON. É compatível com GPON e o *RF-Overlay*, mas bloqueia a norma XG-PON. Tem um orçamento de atenuação semelhante ao do XG-PON, que ronda os 33 dB.

A Figura 13 representa a opção que utiliza a banda C para conter os comprimentos de onda a *downstream* e *upstream*. Isto tem características óticas atraentes do uso de EDFAs

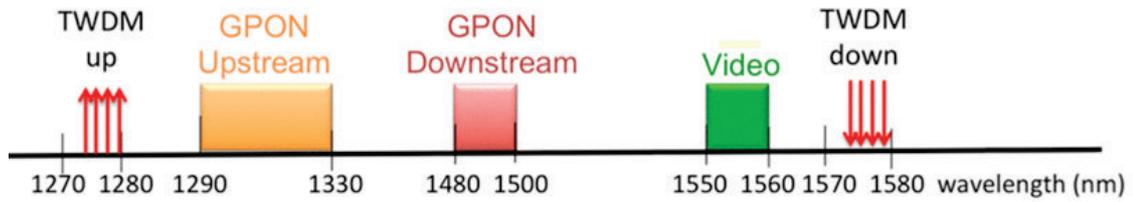


Figura 12: Banda de comprimento de onda TWDM-PON com a reutilização das bandas NG-PON existentes [10]

(amplificadores de fibra dopados com erbio), para amplificação de sinal e de menor perda na fibra de transmissão. Este sistema possui um orçamento de energia maior e um alcance mais longo. É compatível com GPON e XG-PON. O canal de sobreposição do *RF-Overlay* está bloqueado. Com EDFAs, este plano de comprimento de onda poderia atingir um orçamento de atenuação com cerca de 38 dB.

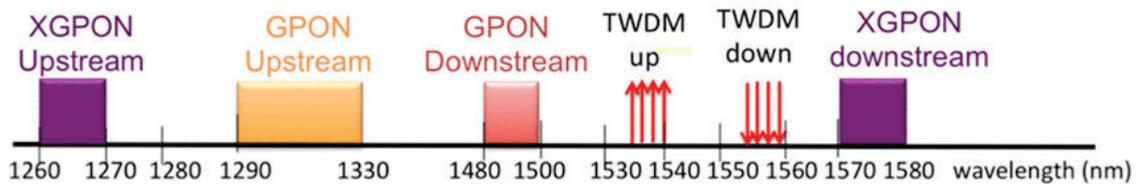


Figura 13: Banda de comprimento de onda TWDM-PON com uso da banda C (se as bandas XG-PON forem usadas, sem uma sobreposição de vídeo presente) [10]

A Figura 14 mostra a terceira opção, que é uma influência dos dois planos anteriores. Os canais *downstream* são projetados na banda L-minus. Os canais *upstream* estão localizados na banda C-minus. Este plano mantém os canais GPON e *RF-Overlay*. A transmissão *upstream* é semelhante ao plano de comprimento de onda acima. Este plano de comprimento de onda é compatível com GPON e *RF-Overlay*, mas bloqueia XG-PON. Os componentes da banda C podem funcionar com um pré-amplificador (EDFA) para fornecer um maior orçamento de energia. Em *downstream*, é necessário um amplificador de banda L para melhorar o orçamento de energia. O orçamento de atenuação de cerca de 38 dB pode ser alcançado. A maioria dos componentes TWDM PON estão disponíveis comercialmente nas redes de acesso. Relativamente às tecnologias anteriores PON, os únicos componentes novos são os recetores e transmissores ajustáveis no ONU. As opções tecnológicas para implementar as funções de sintonização de comprimento de onda necessárias na ONU são resumidas da seguinte forma: Recetor ajustável: ajusta a sua receção de ondas para qualquer tipo de comprimentos de onda *downstream* seguindo os comandos da OLT. Esta função pode ser implementada usando tecnologias como o filtro FP (*Fabry-Perot*) sintonizado termicamente [49], filtro de FP com ajuste angular, anel ressonante de sílica sintonizado por injeção [50], filtro de cristal líquido ajustável [51] e detetor FP ajustável termicamente [52];

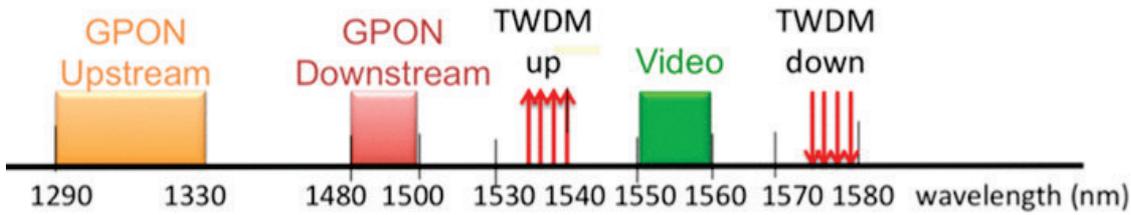


Figura 14: Banda de comprimento de onda TWDM-PON com uso de bandas C e L com sobreposição de vídeo, mas não XG-PON.[10]

Transmissor ajustável: pode sintonizar-se para transmitir em qualquer comprimentos de onda em *upstream*. Utiliza tecnologias como DFB (*Distributed Feedback Laser*) com controlo de temperatura [53], laser DFB com controlo de temperatura parcial [54], laser DBR (*Distributed Bragg Reflector Laser*) (controlo elétrico) [55], laser ECL (*External Cavity Laser*) com controlo mecânico [56] e ECL com controlo térmico/elétrico/piezoelétrico/magneto-ótico [57; 58]. O TWDM toma proveito do trabalho da rede de transporte ótico de várias maneiras. Os transceivers reutilizam os componentes ajustáveis de rede de transporte ótico. Se uma tecnologia não funcionar como esperado, há sempre opções para fornecer as funções necessárias. Isto reduz o risco de disponibilidade dos componentes. Também proporciona alívio nas especificações dos componentes da rede de transporte ótico ajustável. Uma vez que o desempenho do comprimento de onda pode ser suavizado a partir da rede de transporte ótico e as taxas dos canais são amplamente utilizadas na rede de transporte ótico, requisitos críticos tais como, extensão de ajuste de comprimento de onda, velocidade de sintonização, espaçamento de canal, podem ser largamente aliviados. Este alívio de desempenho oferece melhorias significativas durante a produção em massa e redução de custos para transceivers ajustáveis.

2.3.4 Protocolo ICTP

O ICTP (*Multi-Wavelength PON Inter-Channel-Termination Protocol*) é o protocolo, especificado em TR-352 [59], utilizado na comunicação entre NG-PON₂ CTs. É um protocolo peer-to-peer, com um formato de mensagem binária. Estes CT necessitam de trocar informações de estado e configuração de perfil de canal, coordenar operações de unidades de rede ótica sintonizáveis (ONUs), como a ativação e ajuste de ONUs e a mitigação de ONUs ilegais ao sistema, para além de outras funcionalidades.

A interoperabilidade dos CTs da OLT permite a diversidade de fornecedores TWDM e P2P WDM NG-PON₂, bem como de TWDM CTs para fins corporativos e residenciais. Esta interoperabilidade é também contributiva para cenários de ambientes cooperativos multi-operador, onde diferentes operadoras partilham o mesmo ODN, utilizando apenas

um subconjunto disponível de pares de canais de comprimento de onda NG-PON2. Este protocolo também pode ser usado por pares de canais de comprimento de onda PON único, como por exemplo XGS-PON, para troca de informações para fins de proteção [60]. Melhora a segurança de sistemas de comprimento de onda múltiplo PON, suportando meios para detectar e mitigar certos tipos de padrões maliciosos e mal-intencionados por parte dos clientes PON.

O objetivo principal do ICTP é lidar com as interações entre CTs, de forma que qualquer ONU possa mudar de um canal de comprimento de onda para outro, sem que perca a garantia de continuidade da camada TC. Para desempenhar esta função, o protocolo baseia-se na suposição de que as informações sobre o par de um canal a ser usado por cada ONU provisionada no sistema, está disponível para todos os CTs ou está disponível para pelo menos um, e podendo ser partilhada com qualquer outro. Esta suposição é válida apenas para um único operador ou para multi-operadores num ambiente cooperativo.

O processo de decisão que seleciona os canais de comprimento de onda para uma ONU específica são baseados em políticas multi-nível especificadas pelo operador (tais como balanceamento de carga, economia de energia, proteção de serviços, etc.) ou por uma entidade funcional abstrata WMM (*Wavelength Mobility Manager*), que está localizada fora da OLT. Concetualmente, o WMM reside nas funções de gestão de nível superior.

2.3.5 Outros protocolos

À parte da rede final, da rede de acesso, a qual trata este trabalho, é usado atualmente o protocolo MPLS (*Multi Protocol Label Switching*) no acesso ao núcleo da rede. Este protocolo faz chegar por *uplinks*, os dados do núcleo da rede. Os *uplinks* são por sua vez a vias de comunicação, através de fibras únicas, com capacidade de 10 Gbps, que fazem a ligação com a OLT, que distribui posteriormente com a rede de acesso até aos clientes finais.

Anteriormente era usado o protocolo SDH, mas atualmente é uma tecnologia legada, devido às suas desvantagens, sendo uma tecnologia TDM, por exemplo, ao não havendo dados para enviar, a largura de banda era desperdiçada [61].

A utilização do MPLS vem trazer mais vantagens, pois é um protocolo procedente aos SDH/SONET. É um protocolo de alto desempenho, que encaminha os dados entre nós, baseado em etiquetas de menor caminho, e não em endereços de rede, evitando desta forma as tradicionais consultas nas tabelas de encaminhamento [62].

2.3.6 Cenário de Serviços

A OLT suporta os seguintes serviços *Ethernet* sobre esta tecnologia, exemplo na Figura 15:

- N:1

- Múltiplos clientes podem usar a mesma etiqueta de serviço (NNI-S-TAG);
- *Tunneling* de tráfego baseado em S-TAG.
- **1:1**
 - S-TAG única;
 - Comutação de tráfego baseado em S-TAG e S-TAG + C-TAG.
- **TLS - Serviços LAN Transparentes**
 - O tráfego não é processado;
 - O CPU não é parte do EVC;
 - Pode ser usada a topologia 1:1 e N:1.

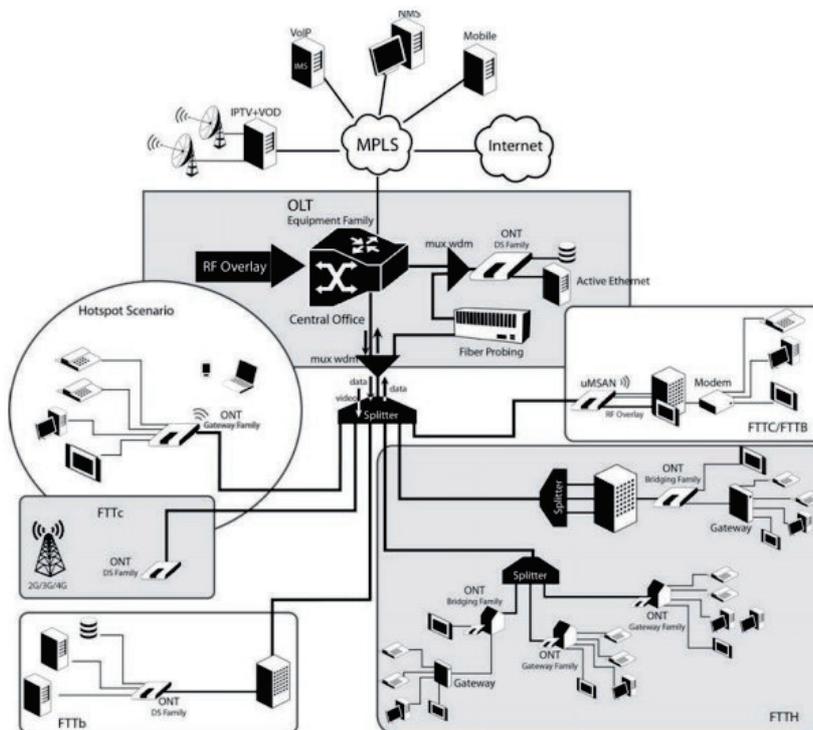


Figura 15: Cenários de serviço da OLT [11]

O cenário de serviços da OLT inclui o suporte para a provisão dos seguintes serviços, como mostra também a Figura 16:

- **Serviços de voz** - VoIP (*Voice over IP*) e ToIP (*Telephony over IP*) controlados por alternância controlada, incluindo serviços IP Centrex e serviços SIP Trunk;
- **Serviços de Internet** - Internet de alta velocidade na ordem de 1 Gbps para 40 Gbps com priorização e diferenciação de tráfego;

- **Comunicações de multimédia** - como voz e presença, mensagens unificadas, localização, conferência, etc;
- **Serviços *backhaul* móveis** - Aplicável às redes WiMax, 2G, 3G, 4G e 5G. Suporta sinais de sincronização transparentes (frequência, fase e tempo) de acordo com os protocolos NTP (*Network Time Protocol*) e PTP (*Precision Time Protocol*);
- **Serviços de vídeo** - IPTV, RF Video (DTH + CATV);
- **Serviços Residenciais *Multiplay*** - Voz, VoIP, HSI (*High Speed Internet*), *RF-Overlay*, IPTV;

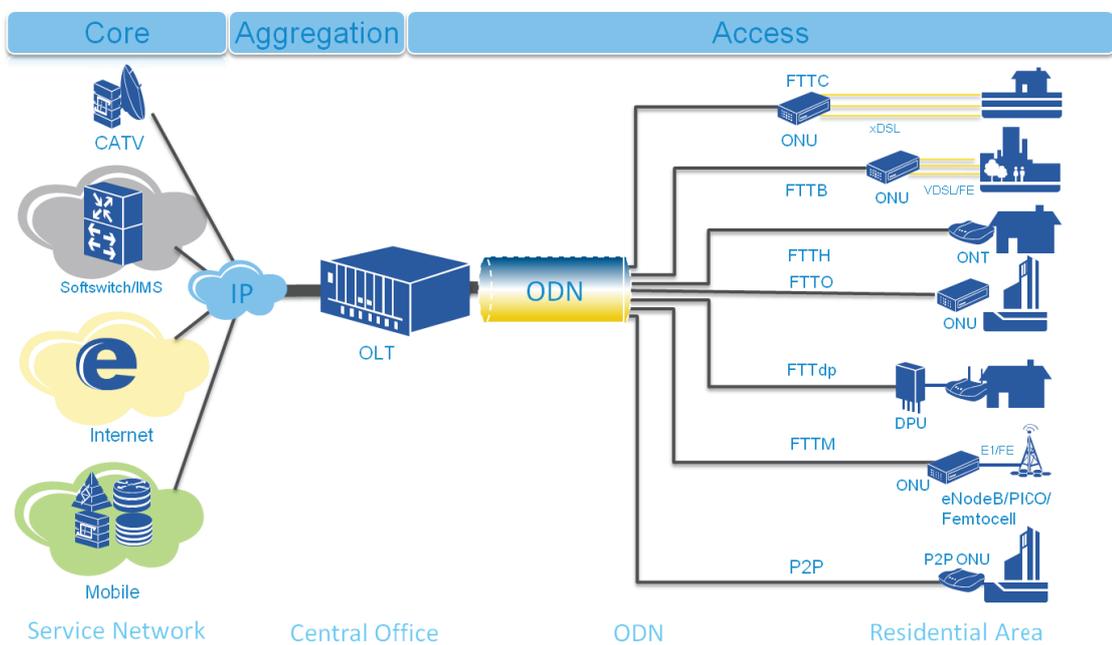


Figura 16: Suporte para a provisão de serviços da OLT [12]

ESPECIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA

Neste capítulo será abordada a solução proposta neste trabalho. Na secção 3.1 será descrito o cenário GPON, bem como a especificação dos seus componentes e configurações efetuadas. Na secção 3.2 será descrito o cenário NG-PON2, com especificação de componentes e configurações. E por ultimo, na secção 3.3, será descrito o cenário híbrido, que resulta na junção dos cenários de GPON e NG-PON2. Uma vez que um dos principais objetivos que categorizam esta tecnologia são os seus elevados débitos de tráfego, o mais lógico será criar um serviço nos três cenários, que simulará o serviço providenciado pelos ISPs, de HSI (*High Speed Internet*). É o serviço mais comum nas arquiteturas FTTx/Residencial/Corporativo.

3.1 CENÁRIO GPON

Para conseguir chegar a uma arquitetura de próxima geração que seja capaz de dar resposta às necessidades atuais, foi necessário criar um cenário com a tecnologia utilizada nos dias de hoje, para posteriormente termos a capacidade de comparar ambas as tecnologias neste trabalho.

3.1.1 Descrição

Para este cenário, a topologia utilizada foi semelhante ao que pode ser encontrado em serviços residenciais, como se pode verificar na Figura 17. Para tal foi utilizada uma OLT1T1, com as cartas TG16G, CXO160G e um kit FAN (módulo de ventilação), na qual alimentavam do lado do cliente dois ONTs, passando antes por um divisor ótico.

3.1.2 Componentes

O cenário é composto por vários componentes entre eles elementos ativos e passivos. Nesta subsecção será descrita a sua função no sistema, bem como as respetivas especificações.

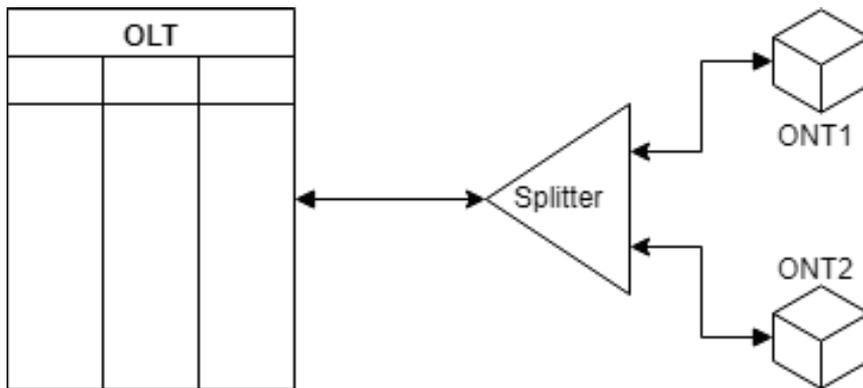


Figura 17: Esquema cenário GPON

SUB-RACK-OLT₁T₁

A OLT é um sistema modular especialmente dedicado para infraestruturas GPON FTTx P2M. É um sistema de alta disponibilidade que usa proteção comum de elemento 1+1 (*Power, Switch Fabric and Processing*) e balanceamento de carga LACP nas interfaces de *uplink*. *Multicast* e *snooping* IGMPv2/v3 (*Internet Group Management Protocol*) com relatório *proxy*, capacitam uma prestação de serviços de IPTV flexível. O sistema OLT garante a interoperabilidade da camada 2 e da camada 3 com o segmento de transporte da rede. Este equipamento, Figura 18, possui uma capacidade de comutação de 160 Gbps através da unidade Matriz. A placa traseira apenas faz a conexão física entre ranhuras (energia e dados).

Figura 18: OLT₁T₁ [13]

CXO160G

Na Figura 19 está representada a carta matriz da OLT, que dá acesso ao equipamento, possuindo duas entradas *Ethernet* de gestão. Este tipo de gestão tem a capacidade de

monitorizar todas as cartas inseridas na OLT, todos os equipamentos ligados a cada carta, o total de serviços criados e atribuídos a cada equipamento, e mais opções desde alarmes, relatórios e etc. No caso desta OLT ser uma OLT_{1T1}, esta carta possui também dois portos de *uplink* de 10 GbE, que irão funcionar como porta de acesso da OLT, fazendo uso de transceivers XFP (10 *Gigabit Small Form Factor Pluggable*). A sua capacidade de comutação é de 160 Gbps.



Figura 19: CXO160G [13]

TG16G

Esta carta, Figura 20 é o módulo de acesso GPON, distribui o sinal que é recebido na OLT, neste caso, em dezasseis portos PON. O sinal que passa por esta carta, é emitido e/ou recebido pelos transceivers SFP (*Small Form Factor Pluggable*).



Figura 20: TG16G [13]

Transceiver SFP

O SFP é um transceiver de módulo ótico compacto, *hot-swappable* (pode ser trocado sem desligar ou interromper algo no sistema) usado para aplicações de telecomunicações e comunicação de dados. Existem SFPs compatíveis com SONET, *Gigabit Ethernet*, fibra ótica entre outros.

Os SFPs estão disponíveis com várias especificações de transmissão e receção, aplicando o SFP apropriado para cada ligação para fornecer o alcance ótico necessário sobre o tipo de fibra ótica disponível. São também diferenciados pela velocidade de transmissão. São classificados de diferentes formas, dependendo das taxas de débito, distância e fibra em

que irão atuar. O utilizado é da série Bx, Figura 21, SFP GPON B+ CT, é um transceiver bidirecional (1310/1490 nm) de fibras únicas, possuindo também a capacidade de usar 1550 nm (*RF-Overlay*) no sentido descendente (o que não foi utilizado neste cenário). Este transceiver tem a capacidade de ligação até cerca de 20 km de distância.



Figura 21: SFP GPON Bx [14]

Transceiver XFP

O XFP é uma norma para transceivers de alta velocidade. São *hot-swappable* e independentes de protocolo. Operam em comprimentos de onda próximos do infravermelho 850 nm, 1310 nm ou 1550 nm. As principais aplicações incluem 10 *Gigabit Ethernet*, canal de fibra de 10 Gbps, SONET em taxas OC-192, SONET STM-64, entre outras. Operam num único comprimento de onda ou usam técnicas de multiplexagem por divisão de comprimento de onda densa. Incluem diagnósticos digitais que fornecem funcionalidades para a gestão. Neste cenário, o XFP é o transceiver do *uplink* de dados. O XFP está disponível em vários tipos de transmissor e recetor, categorizando-se nos seguintes grupos:

- SR - para um máximo de 300 m;
- LR - para distâncias de até 10 km;
- ER - para distâncias de até 40 km;
- ZR - para distâncias de até 80 km.

ONT SFU

O ONT SFU utilizado foi o que normalmente a MEO fornece aos clientes residenciais, Figura 22. Possui uma interface PON (1 x 10/100/1000Base-T), na qual recebe e transmite o sinal ótico e uma interface *Ethernet*, que liga ao *router* residencial.



Figura 22: ONT SFU [15]

3.1.3 Configurações do cenário

Para criar um cenário totalmente operacional, foi necessário criar certas configurações de rede, tais como interfaces de rede, serviços.

Neste cenário, como mostra a Figura 23, foi necessário criar VLANs NNI e UNI, às quais dependendo do dispositivo têm etiquetas associadas de diferentes valores. O serviço de rede foi criado com a NNI S-TAG 11 (etiqueta de serviço) e a S-VLAN (VLAN de serviço) 4009. Do lado da terminação da rede, dos ONTs, foram atribuídas as UNI C-TAG (etiqueta de cliente) 12 e 13, respectivamente, sendo estas etiquetas invisíveis à OLT, e a etiqueta NNI do cliente, NNI C-TAG (ou C-VLAN) 4009 a ambos os ONTs. Considerando que a potência

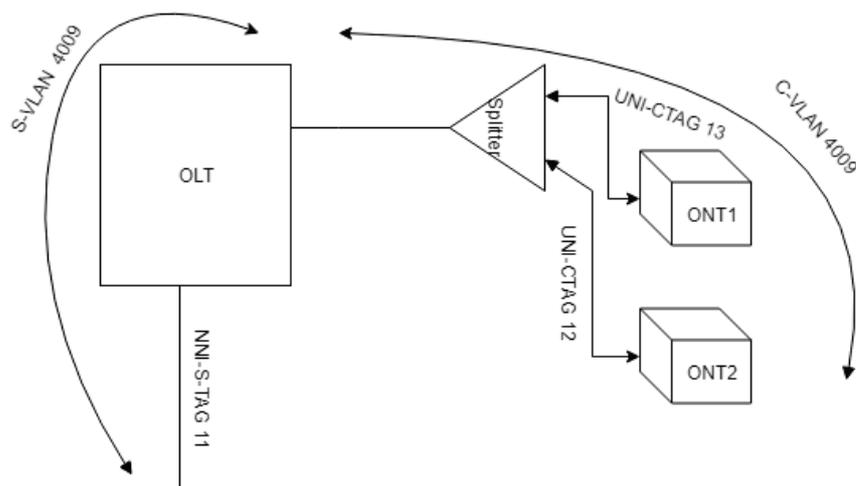


Figura 23: Cenário GPON com interfaces de rede

de transmissão GPON é entre 1.5 e 5 dBm inclusive [63], e a potência de recepção no ONT varia entre -8 e -28 dBm inclusive [63], foi necessário utilizar um atenuador óptico para baixar

a diferença de valores de potência desde a transmissão até a recepção. Este atenuador simula a atenuação que a luz sofre ao longo da distância física nas redes de acesso. Foi utilizado um atenuador de 20 dB, como se pode verificar na Figura 24.

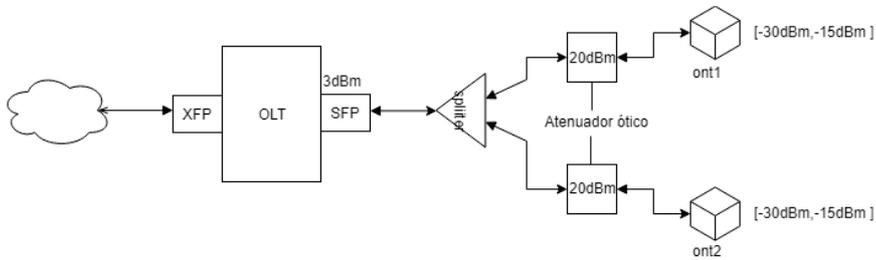


Figura 24: Esquema de potência ótica

3.2 CENÁRIO NG-PON2

O seguinte cenário encaixa na descrição de um protótipo da arquitetura NG-PON2 a propor. Na secção 3.2.1 contém a descrição do cenário.

3.2.1 Descrição

Como descrito no capítulo 2.3, uma das principais vantagens do NG-PON2 é a possibilidade de enviar até quatro comprimentos de onda diferentes a mesma fibra ótica. Isto devido ao WDM, que multiplexa os comprimentos de onda, como mostra a Figura 25. Devido ao facto desta tecnologia ser ainda muito recente, o cenário NG-PON2 representado na Figura 26 possui só um cliente, apenas com um comprimento de onda. Como consequência, não foi efetuada multiplexagem, pelo que o TWDM foi colocado à mesma no cenário.

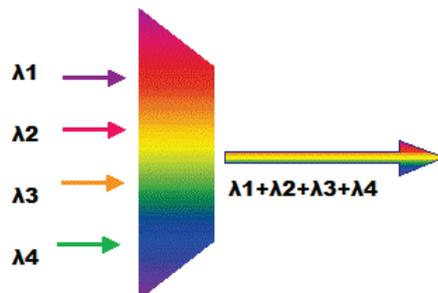


Figura 25: Esquema da multiplexagem de quatro comprimentos de onda

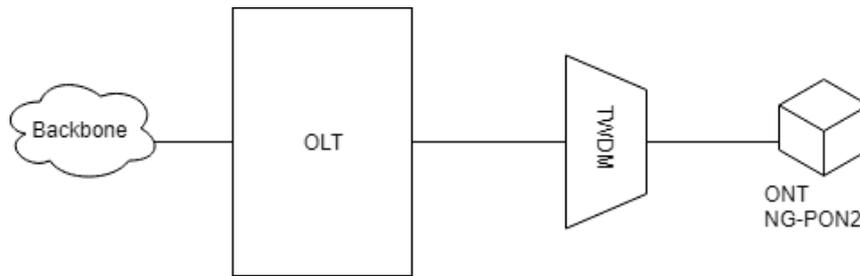


Figura 26: Cenário base NG-PON2

3.2.2 Componentes

Como descrito na secção 3.2.1, este cenário também é composto por vários componentes ativos e passivos. Nesta subsecção será descrita a sua função no sistema bem como as respetivas especificações.

SUB-RACK-OLT₁T₁

Neste cenário foi utilizada a mesma OLT que no cenário anterior.

OLT₁T₁ FAN KIT

Neste cenário foi utilizado o mesmo FAN KIT que no cenário anterior.

CXO160G

Neste cenário foi utilizada a mesma carta matriz que no cenário anterior.

TT04SXG

Esta carta, Figura 27, tem a função semelhante à da TG16G no GPON, possui 4 portos de 10 Gbps cada, possuindo na junção de todos, 40 Gbps. Os transceivers utilizados nesta carta são os XFP, podendo atuar com as seguintes taxas de dados: 10/10 Gbps, 10/2.5 Gbps, *downstream* e *upstream* respetivamente.



Figura 27: TT04SXG

Transceiver XFP

Neste cenário foi utilizado mesmo XFP para *uplink* que no cenário anterior. O transceiver de fibra única para o comprimento de onda para o cliente, foi um XFP com as seguintes características:

- Díodo laser EML (*Electro-absorption Modulated Laser*) na banda L como transmissor de modo contínuo de 9,95 Gbps;
- APD (*Avalanche Photodiode*) na banda C como recetor de modo *burst* de 2,488 Gbps ou 9,95 Gbps.

NG-PON2 ONT-SFU

O ONT, representado na Figura 28, utilizado possui uma taxa de *bits* de 10 Gbps *upstream* e *downstream*, em termos de transmissão e receção é alterável e não fixo (como se verifica no caso do XGS-PON) e comunica com os seguintes comprimentos de onda 1596.34 nm, 1597.19 nm, 1598.04 nm e 1598.89 nm para *downstream* e 1532.68 nm, 1533.47 nm, 1534.25 nm e 1535.04 nm para *upstream*, sendo que, aquando ligado à rede de fibra e encontrando-se no estado detetado e gerido na OLT, o ONT começa à escuta nos quatro comprimentos de onda (um de cada vez), até trancar no que lhe está destinado, definido pela OLT.

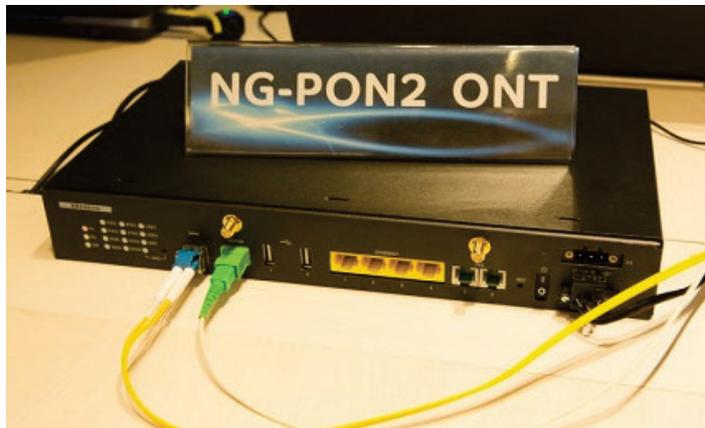


Figura 28: NG-PON2 ONT-SFU

3.2.3 *Configurações do cenário*

Várias configurações foram criadas, à semelhança do que foi feito no cenário de GPON. Foram criadas as seguintes VLANs de serviço, S-VLAN 4010, e de cliente, C-VLAN 4010. As etiquetas de serviço e cliente criadas foram as seguintes: NNI-S-TAG 14 para a interface

um elemento de coexistência, que faz a junção da fibra de saída do TWDM (NG-PON2) e da fibra do porto PON da TG16G (GPON) numa única fibra. Esta fibra ótica, que transporta comprimentos de onda de ambas as tecnologias, liga a um divisor ótico, que divide o sinal para os 2 clientes finais.

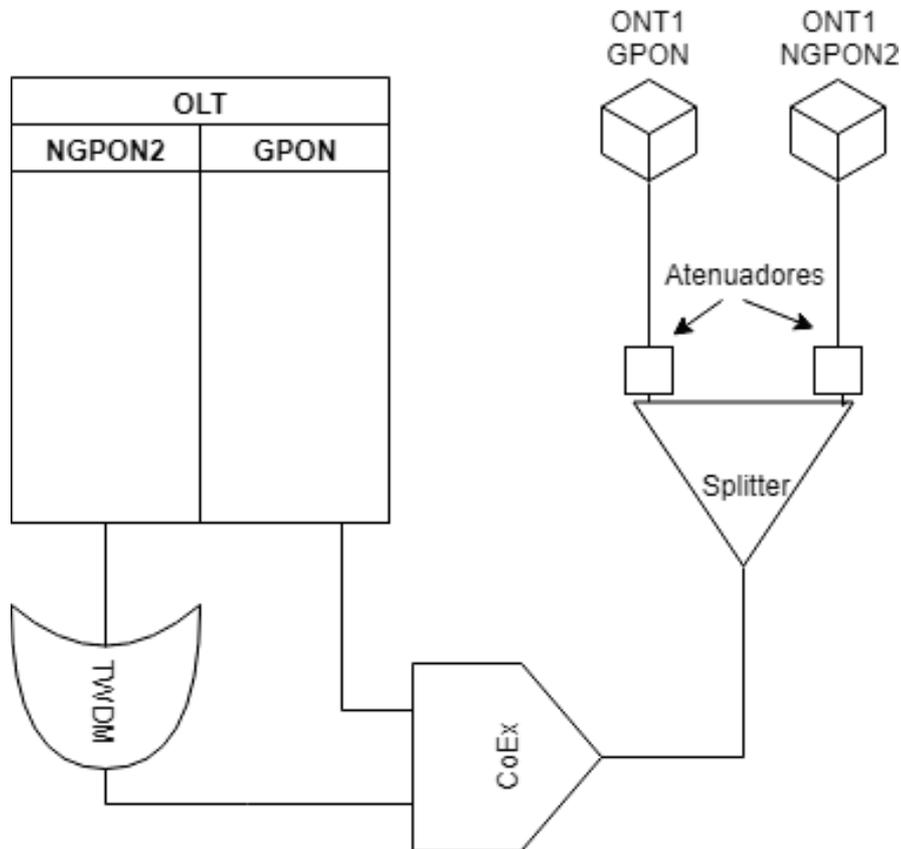


Figura 30: Topologia de coexistência

3.3.2 Componentes

Os componentes utilizados foram os mesmo que nos cenários anteriores, com a adição do elemento de coexistência.

SUB-RACK-OLT₁T₁

Neste cenário foi utilizada a mesma OLT que no cenário anterior.

OLT₁TLL₁ FAN KIT

Neste cenário foi utilizado o mesmo FAN KIT que no cenário anterior.

CXO160G

Neste cenário foi utilizada a mesma carta matriz que no cenário anterior.

TT04SXG

Neste cenário foi utilizada a mesma TT04SXG que no cenário anterior.

TG16G

Neste cenário foi utilizada a mesma TG16G que no cenário GPON.

Transceiver SFP

Neste cenário foram utilizados os mesmos transceivers que nos cenários anteriores.

Transceiver XFP

Neste cenário foram utilizados os mesmos transceivers que nos cenários anteriores.

ONT SFU

Neste cenário foi utilizado o mesmo ONT SFU que no cenário GPON.

NG-PON2 ONT-SFU

Neste cenário foi utilizado o mesmo SFU NG-PON2 que no cenário anterior.

3.3.3 *Configurações do cenário*

As configurações mantiveram-se as mesmas que nos cenários anteriores.

EQUIPAMENTOS E TESTES EFETUADOS

Este capítulo aborda os testes efetuados e equipamento utilizado. Na secção 4.1 será feita uma descrição do equipamento UX400 e descritos os motivos da sua utilização neste trabalho. Na secção 4.2 irá ser descrita a configuração do teste de *throughput*. Na secção 4.3 irá ser descrita a configuração do teste RFC2544.

4.1 EQUIPAMENTO UX400

Para testar, em todas as topologias criadas no capítulo anterior, a capacidade de largura de banda, foi necessário recorrer a um gerador de tráfego, para simular cenários de carga de dados sobre a rede. O aparelho utilizado foi o UX400 da VeEX Inc. O VeEX UX400 é uma solução de teste de transporte multi-serviço. Este aparelho tem a capacidade de testar de ambos os lados, ou seja, funcionar como ISP e como cliente, ou seja, liga à OLT e ao ONT. Com o objetivo de verificar a grande diferença entre as duas tecnologias PON, foram efetuados os seguintes testes nos cenários anteriormente descritos.

O primeiro teste efetuado foi de *throughput* (taxa de tráfego), e o segundo teste foi baseado na referência RFC2544. Nas Figuras seguintes, 31 32 33, está representada a esquemática utilizada em ambos os testes, com as configurações dos equipamentos. Relativamente aos testes efetuados no cenário híbrido, foi necessário alocar 90% para o cliente NG-PON2 (cerca de 9 Gbps) e 10% para GPON (cerca de 1 Gbps), devido à porta ótica do módulo que liga à OLT ter a capacidade de taxa de tráfego de 10 Gbps. Desta forma, não é possível verificar a total a capacidade de 10 Gbps para NG-PON2 e 2,5 Gbps para GPON. Tentando desta forma alocar a largura de banda aproximada ao real. Relativa à Figura 33, a porta ótica do gerador de tráfego que liga a OLT é uma porta de 10 Gbps, bem como a que liga ao NG-PON2 ONT-SFU (ONT1 NGPON2 na figura). Nas Figuras 31 e 33, os ONT SFU GPON ligam ao gerador de tráfego através de uma porta *Ethernet* através de um cabo UTP (taxa de transmissão máxima de 100 Mbps), que se assemelha à ligação a um *router* residencial.

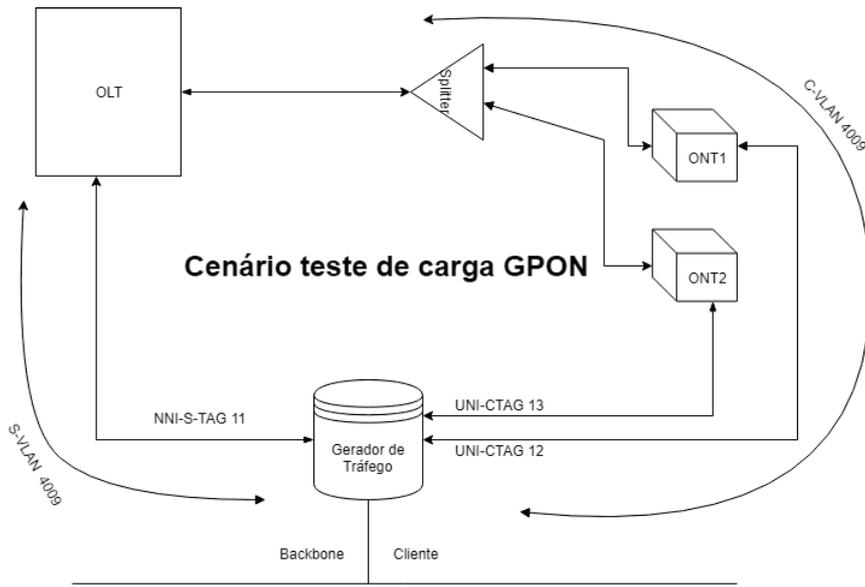


Figura 31: Topologia do teste de carga para o cenário GPON

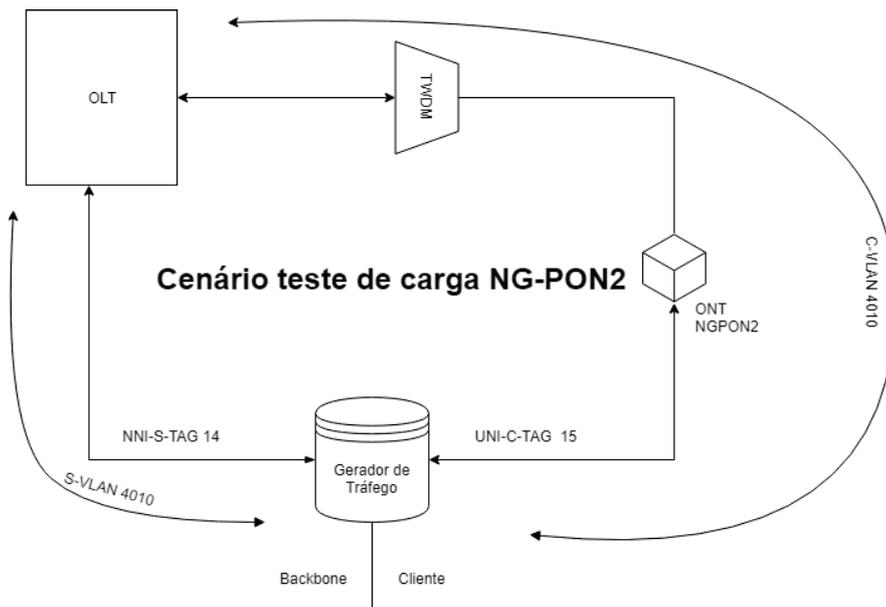


Figura 32: Topologia do teste de carga para o cenário NG-PON2

4.2 TESTE DE THROUGHPUT

Este teste executa as seguintes medidas: desempenho de *throughput*, análise de perda de tramas, análise de atrasos, análise de chegada de pacotes/tramas, análise de tipo de tráfego recebido e análise da quantidade de tráfego recebido. No lado em que é feita a transmissão,

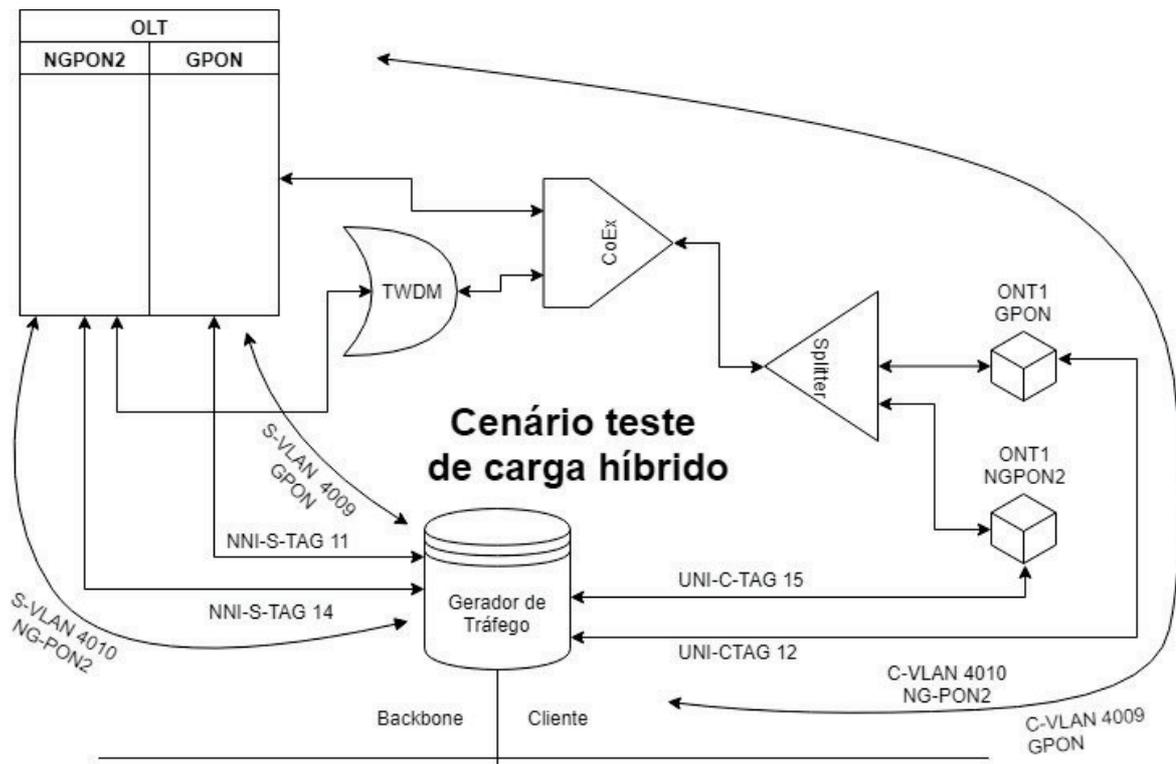


Figura 33: Topologia do teste de carga para o cenário híbrido

é permitido um fluxo com endereço MAC e IP, etiquetas de VLAN (até três), largura de banda/taxa, tamanho da trama e parâmetros de QoS L2 e/ou L3. No recetor final, o tráfego é analisado com base no fluxo, bem como uma medição global ou agregada. Esta aplicação é extremamente importante para verificar o transporte de tráfego através da ligação de rede. Os pacotes que compõem o tráfego deste teste não funcionam como pedido e resposta do cliente ou ISP. O tráfego deste teste é gerado continuamente, e em ambos os sentidos. Para este teste é possível configurar múltiplas streams de tráfego (funcionando como uma ligação a cada cliente), tendo cada *stream* duas análises, *upstream* (do lado do cliente) e *downstream* (do lado do ISP). No caso do cenário de GPON foram utilizadas duas *streams*. No sentido *downstream*, para a *stream* 1, as configurações do cabeçalho do pacote de *throughput* encontram-se na seguinte Tabela 5.

Camada de teste	Camada 3
Tipo de Trama	<i>Ethernet II (DIX)</i>
VLAN	2 etiquetas
MPLS	N.A.

Tabela 5: Cabeçalho do pacote de *throughput downstream* GPON

O endereço MAC de origem atribuído foi 00-18-63-00-00-01 e o de destino 00-18-63-00-00-02 e o *Ethernet Type* 0800-IP. Quanto ao IP, a versão foi IPv4, com o IP de origem 192.168.0.1 e de destino 192.168.0.2, o tipo de serviço IP (IP TOS) atribuído foi DSCP (*Differentiated Services Code Point*). A VLAN foi utilizada com 2 etiquetas, 4009 para S-VLAN e 11 para NNI-S-TAG. É possível verificar-se o cabeçalho na Figura 34. O tipo de dados foi PRBS

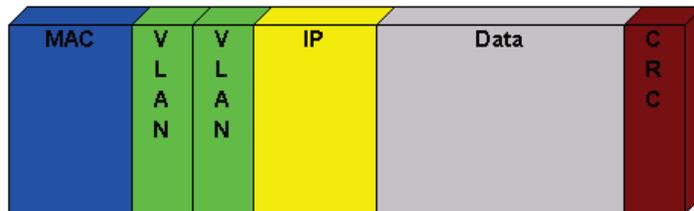


Figura 34: Cabeçalho *downstream* do teste GPON

2E11-1 (*Pseudorandom Binary Sequence*). As configurações do tráfego de *throughput* foram, fluxo de tráfego constante, tamanho fixo da trama, 1518 bytes, sendo este o tamanho maior de trama disponível no teste. Para a *stream* 2 foram usadas as mesmas configurações, à exceção do IP de destino, que é 192.168.0.3, endereço MAC 00-18-63-00-00-03. No sentido *upstream*, as configurações foram as da Tabela 6, devido a só existir uma *stream* (cliente - ISP).

Camada de teste	Camada 3
Tipo de Trama	<i>Ethernet II (DIX)</i>
VLAN	1 etiqueta
MPLS	N.A.

Tabela 6: Cabeçalho do pacote de *throughput upstream* GPON

Em relação ao *upstream*, a configuração é semelhante, sendo que os endereços de IP e MAC são cruzados, trocando a origem com o destino e vice versa. No caso da VLAN, foi só utilizada uma etiqueta, VLAN UNI-C-TAG 12. Pode verificar-se a diferença de cabeçalhos na Figura 35. Estas alterações, comparativamente com o *downstream*, verificam-se em ambas as *streams* 1 e 2.

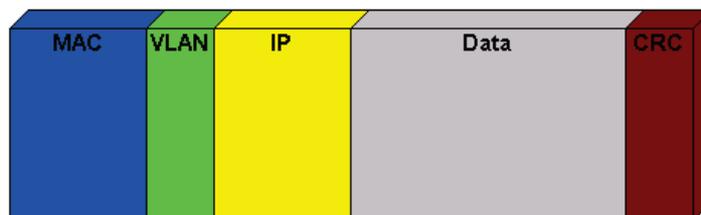


Figura 35: Cabeçalho *upstream* do teste GPON

Neste caso foi alocado 12,5% de largura de banda a cada *stream* de *downstream*, pois a taxa de débito do GPON é de 2,5 Gbps neste sentido (12,5% de 10 Gbps = 2,5 Gbps). Já no sentido oposto, *upstream*, a largura de banda foi alocada com 100%, pois o porto do lado do cliente é de 1 Gbps (100Base-T).

No caso do cenário NG-PON2 foram utilizadas duas portas de 10 Gbps, pois o NG-PON2 ONT-SFU tem mais que uma porta PON disponível para utilização, ao contrário do ONT SFU do GPON utilizado, que só possui uma, a que liga à rede de acesso. Neste cenário só foi utilizada uma *stream*. A configuração foi semelhante à do teste de GPON. Para o tráfego *downstream* o MAC de origem 00-18-63-00-00-01 de destino 00-18-63-00-00-02, IP de origem 192.168.0.1 e de destino 192.168.0.2. A VLAN foi utilizada com 2 etiquetas, 4010 para S-VLAN e 14 para NNI-S-TAG. Para o tráfego *upstream* foi configurado da mesma forma, exceto com os endereços cruzados e a VLAN UNI-C-TAG 15. Foi alocado 100% da largura de banda (10 Gbps) para *downstream* e *upstream*.

No caso do cenário híbrido, a semelhança nas configurações também se repete. Foram utilizadas também 2 streams. Os endereços utilizados foram os mesmo, exceto o IP do NG-PON2 ONT-SFU ficou 192.168.0.1 e do ONT 1 SFU do GPON 192.168.0.2, e o mesmo nos endereços MAC, 00-18-63-00-00-02 para NG-PON2 e 00-18-63-00-00-03 para GPON. As VLANS mantiveram-se como no teste do cenário GPON. A única diferença neste teste, foi na alocação de largura de banda para os clientes. Foi atribuído 90% dos 10 Gbps de *uplink* ao NG-PON2 (9 Gbps) e 10% para o GPON (1 Gbps). Esta problemática deve-se ao facto do porto do gerador de tráfego que funciona como *uplink* à OLT ser de 10 Gbps.

4.3 TESTES SEGUNDO O RFC 2544

A *Internet Engineering Task Force RFC (Request For Comments) 2544* descreve um conjunto de testes para dispositivos de rede [65]. O RFC 2544 fornece um formato comum de linguagem e resultados. Descreve seis testes:

- *Throughput*: Mede a taxa máxima em que nenhuma das tramas oferecidas é descartada pelo dispositivo/sistema em teste. Esta medida traduz a largura de banda disponível da conexão virtual *Ethernet*.
- Capacidade *back-to-back* ou *burstability*: Mede a sequência mais longa de tramas com máximo *throughput* ou separação mínima entre tramas que o dispositivo ou a rede sob teste lidará sem perda de tramas. Esta medida é uma boa indicação da capacidade de *buffer* de um dispositivo.
- Perda de Tramas: Define a percentagem de tramas que devem ter sido encaminhados por um dispositivo de rede sob cargas estáveis (constantes) e que não foram enca-

minhados devido à falta de recursos. Esta medida pode ser utilizada para relatar o desempenho de um dispositivo de rede num estado de sobrecarga.

- **Latência:** é o intervalo de tempo desde que o primeiro *bit* da trama é enviado pelo transmissor até que o último *bit* da trama é recebido pelo recetor. De notar que neste equipamento, utilizam o termo latência para descrever o RTT (*Round Trip Time*), sendo que a partir desta secção irá ser utilizado termo latência para descrever o tempo de ida e volta levado por uma trama de teste para viajar através da rede e de volta para a porta de teste A variabilidade de latência pode ser um problema. Por exemplo em protocolos como VoIP, uma latência variável ou longa pode causar degradação na qualidade de voz.
- **Reinicialização do sistema:** mede a velocidade na qual um dispositivo se recupera de uma reinicialização de *hardware* ou *software*. Este teste é realizado medindo a interrupção de um fluxo contínuo de tramas durante o processo de reinicialização.
- **Recuperação do sistema:** mede a velocidade na qual um dispositivo se recupera de uma condição de sobrecarga ou excesso de subscrições. Este teste é executado temporariamente inscrevendo excessivamente o dispositivo em teste e, em seguida, reduzindo o *throughput* com carga baixa ou normal durante a medição do atraso de tramas nessas duas condições. A diferença entre o atraso na condição de sobrecarga e as condições de atraso e baixa carga representam o tempo de recuperação.

O conjunto de testes RFC 2544 suportado pelo equipamento UX400 consiste em *throughput* (taxa de transferência), latência, perda de tramas e *burst* (*back-to-back*). Este teste foi efetuado de forma diferente do anterior. Ao invés de ser testado para cada cenário, foram efetuadas 3 medições, para o porto do *uplink* (ISP), para o cliente NG-PON2 e GPON. Foi necessário atribuir as seguintes configurações: camada de teste (camada 2 e 3), cabeçalho da trama (MAC, VLAN, IP, UDP e dados), seleção da trama de teste, passou/falhou *threshold* (opcional), *throughput*, latência, perda de trama e *burst*.

Para o cliente GPON, o cabeçalho foi configurado de forma semelhante ao do teste anterior. Quanto às tramas do RFC2544, foram atribuídos vários tamanhos para o teste, nomeadamente 128, 256, 512, 1024, 1280 e 1518 *bytes*. A configuração do *threshold* encontra-se na Tabela 7. Pode verificar-se os tamanhos das tramas com a respetiva percentagem de *throughput* e latência (em μ s). Na Tabela 8 está representada a configuração do *throughput*, com a taxa máxima de 100% e a sua duração. A Tabela 9 contém as configurações do teste de latência, com a sua duração e o numero de repetições a efetuar. Na Tabela 10 estão representadas as configurações do teste de perda de tramas, que contém a taxa de utilização da linha, duração do teste, tamanho da fase que consiste na percentagem em que a taxa inicial será reduzida no caso de existir perda de tramas. Neste caso, a taxa é de 100% e no caso de existir tramas perdidas a essa taxa, então a taxa será reduzida para 90%. O teste será

Tamanho	Throughput(%)	Latência (μ s)
128 bytes	75.00	2000
256 bytes	80.00	3000
512 bytes	85.00	4000
1024 bytes	90.00	5000
1280 bytes	95.00	6000
1518 bytes	100.00	7000

Tabela 7: Configurações de *threshold* RFC 2544

Taxa máxima	100%
Resolução (%)	1
Duração (s)	20

Tabela 8: Configurações de *throughput* RFC 2544

Teste	Taxa <i>throughput</i> %
Duração (s)	20
Repetição	2

Tabela 9: Configurações de latência RFC 2544

executado na nova taxa até que não se verifique perda de tramas nas duas configurações de taxa consecutivas, ou seja, terá que ser realizado a 80% (supondo que não houve perda de tramas a 90%). Na Tabela 11 podem ser encontradas as configurações do teste de *burst*, na

Taxa	100%
Duração	20
Tamanho de fase (%)	10

Tabela 10: Configurações de perda de tramas RFC 2544

taxa máxima as tramas são sempre transmitidas na taxa máxima para uma duração mínima e máxima de *burst*. Duração mínima é a duração do primeiro *burst* e duração máxima é referente ao segundo *burst*. Repetição é o número de repetições de *burst* para cada trama. Para o NG-PON2 e para a OLT as configurações RFC2544 utilizadas foram as mesmas que

Taxa máxima	100%
Duração máxima	20
Duração mínima	2
Repetição	2

Tabela 11: Configurações de *burst* RFC 2544

as anteriores.

RESULTADOS

Nas secções 5.1 e 5.2 irão ser apresentados e discutidos os resultados obtidos nos testes efetuados e descritos nas secções 4.2 e 4.3 do capítulo anterior.

5.1 RESULTADOS THROUGHPUT

5.1.1 Cenário GPON

Os seguintes resultados foram obtidos do cenário GPON, sendo apresentado primeiro o resultado da parte do ISP, ou seja, tudo o que foi enviado e recebido para e pelos clientes, de forma agregada e também por cada *stream*. O teste teve uma duração de cerca de 30 segundos, sendo que não foi possível ser exatamente o mesmo tempo para os 3 portos, porque não era possível começarem e terminarem ao mesmo tempo, tendo que ser ligado e desligado um de cada vez.

OLT

Para os resultados agregados os resultados foram os seguintes, da Tabela 12 à 15. Com

	TX	RX
Taxa física (Gbps)	10.00	10.00
Utilização (%)	25.00	12.491
Utilização (Gbps)	2.50	1.249
Taxa de tramas (Gbps)	2.468	1.233
Taxa de dados (Gbps)	2.393	1.196
Total de tramas	6367871	3188493
Tramas erradas	0	0
Tramas incompletas	0	0

Tabela 12: Resultado Agregado OLT

a alocação de largura de banda atribuída, na Tabela 12, 25% dos 10 Gbps, sendo 12,5% para cada *stream*, os resultados obtidos estão dentro do esperado. É certo que o valores de

Tramas recebidas	Número	%
Total	3188493	100
Teste	3188510	100.00
VLAN	3188493	100.00
Pilha VLAN	3188493	100.00
L2 Unicast	3188493	100.00
L3 Unicast	3188493	100.00
1518B	3188493	100.00

Tabela 13: Tramas recebidas

	Tempo de chegada de tramas (μ s)
Atual	12.84
Mínimo	9.10
Máximo	514.50
Média	9.86
Variação do atraso	2.97

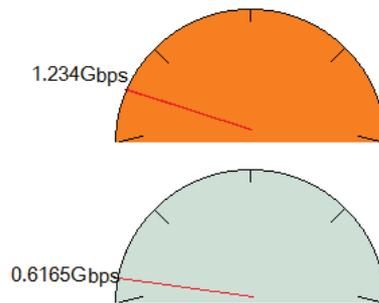
Tabela 14: Resultado do atraso por *stream*

Tramas/s	TX	RX
Atual	626621	50497
Mínimo	626609	50473
Máximo	626621	50498
Média	626615	50497
Taxa de dados	TX (Gbps)	RX (Gbps)
Atual	1.197	0.598
Mínimo	1.197	0.5975
Máximo	1.197	0.598
Média	1.197	0.598

Tabela 15: Resultados da taxa por cada *stream*

débito para o GPON são 2,5 Gbps *downstream* e 1,25 Gbps *upstream*. Sendo enviado cerca de 2,5 Gbps para os ONTs, 1,25 Gbps por *stream*. No sentido *upstream* foram recebidos 1,25 Gbps, sendo o somatório dos 2 clientes, cerca de 625 Mbps de cada cliente, fazendo os 12,5% *upstream*, como se pode verificar na Tabela 16 e 17. Os resultados da Tabela 12, são o resultado agregado das Tabelas 16 e 17, sendo estas duas últimas os resultados de cada *stream*, da visão da OLT. Comparando as Tabelas 13 e 12 é possível confirmar que não houve tramas perdidas, ou seja, foram todas entregues. Tanto no singular como no agregado, a taxa obtida foi semelhante ao previsto, ou ao descrito na norma. A Tabela 14 contém os resultados relativos aos atrasos das tramas. Contém aos valores mínimo, máximo, média e variação do atraso. O valor Atual refere-se ao tempo de atraso no momento em que o teste foi parado. Como se pode verificar nas Figuras 36 e 37 e nas Tabelas 16 e

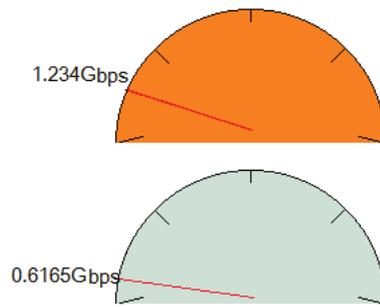
	TX	RX
Utilização (%)	12.50	6.25
Utilização (Gbps)	1.250	0.625
Taxa de tramas (Gbps)	1.234	0.6165
Taxa de dados (Gbps)	1.197	0.598
Total de tramas	3183923	1594250
Tramas erradas	0	0

Tabela 16: Sumário de Resultados *Stream 1*Figura 36: Taxa de tramas da *Stream 1*

	TX	RX
Utilização (%)	12.50	6.25
Utilização (Gbps)	1.250	0.625
Taxa de tramas (Gbps)	1.234	0.6165
Taxa de dados (Gbps)	1.197	0.598
Total de tramas	3183948	1594260
Tramas erradas	0	0

Tabela 17: Sumário de Resultados *Stream 2*

17, ambos os clientes obtiveram resultados muito semelhantes no que toca à transmissão e envio por parte do ISP, quer em termos de taxa de tramas, como taxa de dados. Não houve tramas erradas nem tramas perdidas. Verificando os valores do débito *downstream*, foi possível obter uma taxa de transmissão com valores muito aproximados da ordem dos 2.5 Gbps. No caso do *upstream*, a qualidade do resultado foi igual, taxas na ordem dos 1.25 Gbps, conforme a norma do GPON. Todos estes resultados anteriores foram verificados pelo gerador de tráfego no porto da OLT.

Figura 37: Taxa de tramas da *Stream 2*

	TX	RX
Taxa física (Mbps)	1000.00	1000.00
Utilização (%)	100.00	99.742
Utilização (Mbps)	1000.00	997.42
Taxa de tramas (Mbps)	987.03	984.478
Taxa de dados (Mbps)	959.793	957.30
Total de tramas	2266061	2263899
Tramas erradas	0	0
Tramas incompletas	0	0
Potência ótica (dBm)	N/A	N/A

Tabela 18: Sumário de Resultados *Stream 1**ONT 1*

Como se pode verificar na Tabela 18, fazendo uso total da largura de banda disponível na ligação do gerador de tráfego ao ONT, verificaram-se débitos muito aproximados ao esperado e permitido pelo meio físico, próximos de 1 Gbps.

ONT 2

Nesta situação, na Tabela 19, verificam-se resultados semelhantes aos resultados anteriormente apresentados. É notória uma discrepância no que toca ao somatório do número total de tramas na coluna TX, da Tabela 18 e 19 comparativamente com os valores do total de tramas da coluna RX da Tabela 12. Isso deve-se às taxas de transmissão e ocupação do canal, Figura 38, como os débitos de *upstream* do GPON são de 1.25 Gbps, cada ONT (*stream*) fica com 0,625 Gbps, neste caso, a taxa de dados que existe do gerador de tráfego até ao ONT (aproximadamente 1 Gbps), será menor do ONT para a OLT. Sendo assim, multiplicando o valor de total de tramas transmitidas por um ONT por 6,25%, o resultado será muito próximo do valor total de tramas de *stream* individuais da OLT, Tabelas 16 e 17.

	TX	RX
Taxa física (Mbps)	1000.00	1000.00
Utilização (%)	100.00	99.742
Utilização (Mbps)	1000.00	997.42
Taxa de tramas (Mbps)	987.03	984.478
Taxa de dados (Mbps)	959.793	957.311
Total de tramas	2241564	2263915
Tramas erradas	0	0
Tramas incompletas	0	0
Potência ótica (dBm)	N/A	N/A

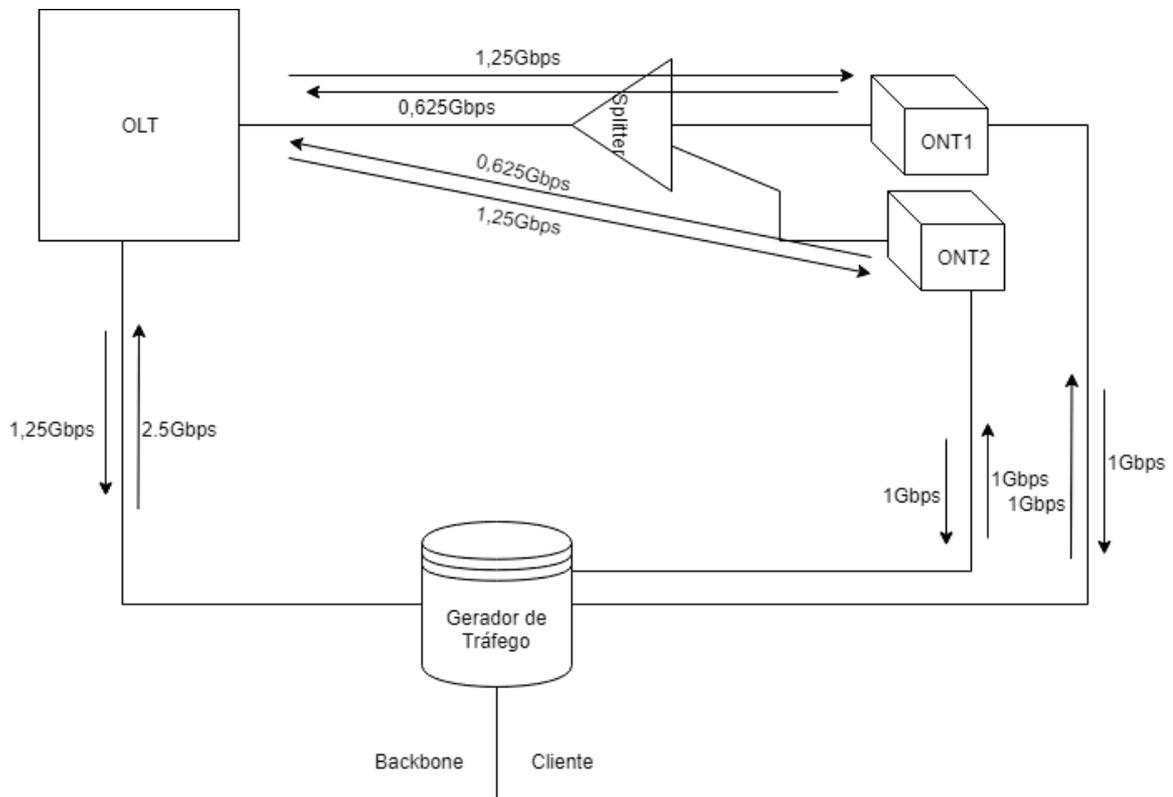
Tabela 19: Sumário de Resultados *Stream 2*

Figura 38: Cenário GPON com taxas de débito representadas

5.1.2 Cenário NG-PON2

O teste para este cenário teve uma duração de cerca de 30s para a OLT. Só foi utilizada uma *stream*, pois este cenário só possui um cliente (ONT).

OLT

Atendendo aos resultados da Tabela 20 é possível verificar que utilizando a totalidade da taxa física da linha, os valores da taxa de tramas e taxa de dados são muito próximos dos valores de débito teórico do NG-PON2 (10 Gbps), quer para tráfego *upstream* e *downstream*. Também não foram verificadas perdas de tramas, nem tramas erradas ou incompletas neste teste.

	TX	RX
Taxa física (Gbps)	10.00	10.00
Utilização (%)	100.00	100.00
Utilização (Gbps)	10.00	10.00
Taxa de tramas (Gbps)	9.87	9.87
Taxa de dados (Gbps)	9.753	9.753
Total de tramas	24408819	24408810
Tramas erradas	0	0
Tramas incompletas	0	0

Tabela 20: Sumário de Resultados NG-PON2 OLT

Tramas recebidas	Número	%
Total	24408810	100.00
Testado	24408815	100.00
VLAN	24408810	100.00
Pilha VLAN	24408810	100.00
L2 Unicast	24408810	100.00
L3 Unicast	24408810	100.00
1518 bytes	24408810	100.00

Tabela 21: Tramas recebidas

A Tabela 21 contém a distribuição de tramas recebidos. Comparando os valores da coluna Número, com a coluna RX da Tabela 20, pode concluir-se que os valores estão em conformidade. A Tabela 22 contém os resultados relativos aos atrasos das tramas. Contém aos valores mínimo, máximo e a média. O valor Atual refere-se ao tempo de atraso no momento em que o teste foi parado.

ONT

Para esta *stream*, o tempo de duração do teste foi de cerca de 31 segundos. É possível confirmar, na Tabela 23, que os débitos do lado do cliente, tanto em *downstream* como *upstream* são também muito próximos aos da norma do NG-PON2. Esta situação deve-se também ao facto do ONT SFU NG-PON2 possuir um porto ótico, para além do que possui para ligação à rede de acesso. Porto este que, estando ligado ao gerador de tráfego, com

Tempo de chegada de tramas	Tempo (μ s)
Atual	1.19
Mínimo	1.19
Máximo	1.20
Média	1.19
Variação do atraso de tramas	Tempo (μ s)
Atual	0.01

Tabela 22: Resultado do atraso

um link de 10 Gbps, permitindo desta forma verificar o esperado, débitos na ordem dos 10 Gbps em *downstream* e *upstream*.

	TX	RX
Taxa física (Gbps)	10.00	10.00
Utilização (%)	100.00	100.00
Utilização (Gbps)	10.00	10.00
Taxa de tramas (Gbps)	9.87	9.87
Taxa de dados (Gbps)	9.753	9.753
Total de tramas	25212009	25212000
Tramas erradas	0	0
Tramas incompletas	0	0
Potência ótica (dBm)	-1.85	-3.38

Tabela 23: Sumário de Resultados NG-PON2 ONT

A Tabela 24 contém a distribuição de tramas recebidos. Comparando os valores da coluna Número, com a coluna RX da Tabela 23, pode concluir-se que os valores estão em conformidade. A Tabela 25 contém os resultados relativos aos atrasos das tramas. Contém

Tramas recebidas	Número	%
Total	25212000	100.00
Testado	25212005	100.00
VLAN	25212000	100.00
Pilha VLAN	25212000	100.00
L2 Unicast	25212000	100.00
L3 Unicast	25212000	100.00
1518 bytes	25212000	100.00

Tabela 24: Tramas recebidas

aos valores mínimo, máximo e a média. O valor Atual refere-se ao tempo de atraso no momento em que o teste foi parado.

Tempo de chegada de tramas	Tempo (μ s)
Atual	1.35
Mínimo	1.19
Máximo	3.80
Média	1.39 s
Variação de atraso de tramas	Tempo (μ s)
Atual	0.04

Tabela 25: Resultado do atraso

5.1.3 Cenário Híbrido

O teste para este cenário teve uma duração de cerca de 1 minuto e 20 segundos.

OLT

De acordo com a Tabela 26, foi utilizada na totalidade toda a largura de banda disponível. Como é possível verificar na Tabela 28, a *stream 1*, que estava alocada para o cliente NG-PON2, com 90% da utilização da largura de banda, obteve uma taxa de tramas de 8.884 Gbps *downstream* e *upstream* e taxa de dados de 8.616 Gbps *downstream* e *upstream*, sem tramas erradas. Na Tabela 30, é possível verificar que a totalidade da largura de banda foram utilizados, 987.075 Mbps em *downstream* e *upstream*. Observando-se uma taxa de dados com os mesmos valores.

	TX	RX
Taxa física (Gbps)	10.00	10.00
Utilização (%)	100.00	100.00
Utilização (Gbps)	10.00	10.00
Taxa de tramas (Gbps)	9.871	9.871
Taxa de dados (Gbps)	9.753	9.753
Total de tramas	67864682	65601416
Tramas erradas	0	0
Tramas incompletas	0	0

Tabela 26: Sumário de Resultados Agregado do Cenário híbrido OLT

ONT NG-PON2

Para este porto, o teste teve uma duração de cerca de 1 minuto e 40 segundos. Consultando os resultados da Tabela 32 e 33, é possível verificar que as taxas de transmissão e receção coincidem com as verificadas do outro lado do cenário, nas Tabelas 26, 27, 28, 29, 30 e 31.

Tramas recebidas	Número	%
Total	65601416	100.00
Testado	65601560	100.00
VLAN	65601416	100.00
Pilha VLAN	65601416	100.00
L2 Unicast	65601416	100.00
L3 Unicast	65601416	100.00
1518 bytes	65601416	100.00

Tabela 27: Tramas recebidas

	TX	RX
Utilização (%)	90.00	90.00
Utilização (Gbps)	9.00	9.00
Taxa de tramas (Gbps)	8.884	8.884
Taxa de dados (Gbps)	8.616	8.616
Total de tramas	61078122	59041404
Tramas erradas	0	0

Tabela 28: Sumário de Resultados do Cenário híbrido OLT *Stream 1*

Tramas/s	TX	RX
Atual	727683	727683
Mínimo	727682	165999
Máximo	727685	727684
Média	727683	711594
Taxa de dados	TX (Gbps)	RX (Gbps)
Atual	8.616	8.616
Mínimo	8.616	1.966
Máximo	8.616	8.616
Média	8.616	8.425

Tabela 29: Resultado das taxas do cenário híbrido OLT *stream 1*

	TX	RX
Utilização (%)	10.00	10.00
Utilização (Mbps)	1000.00	1000.00
Taxa de tramas (Mbps)	987.075	987.56
Taxa de dados (Mbps)	957.32	957.63
Total de tramas	6786560	6560156
Tramas erradas	0	0

Tabela 30: Sumário de Resultados do Cenário híbrido OLT *Stream 2*

ONT GPON

Neste porto o teste teve uma duração de cerca de 2 minutos e 4 segundos. Nas Tabelas 34 e 35 é possível verificar que os resultados dos débitos *upstream* e *downstream* estão de acordo com os valores obtidos e registados do lado da OLT.

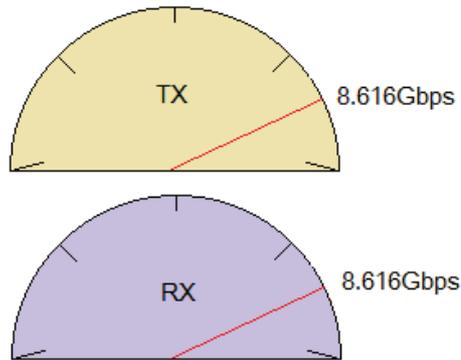


Figura 39: Taxa de dados para a *stream 1*

Tramas/s	TX	RX
Atual	80855	727683
Mínimo	80854	165999
Máximo	80856	727684
Média	80855	711594
Taxa de dados	TX (Gbps)	RX (Mbps)
Atual	957.32	957.422
Mínimo	957.313	218.84
Máximo	957.336	957.422
Média	957.322	936.459

Tabela 31: Resultado das taxas do cenário híbrido OLT *stream 2*

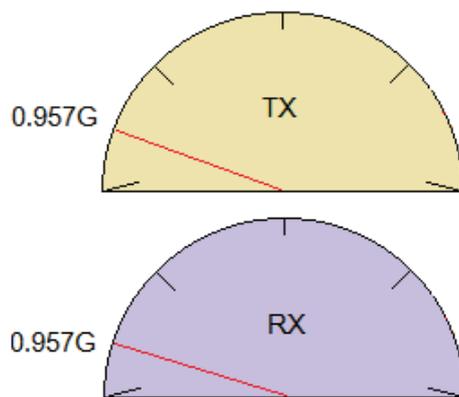


Figura 40: Taxa de dados para a *stream 2*

	TX	RX
Taxa física (Gbps)	10.00	10.00
Utilização (%)	90.00	90.00
Utilização (Gbps)	9.00	9.00
Taxa de tramas (Gbps)	8.883	8.49
Taxa de dados (Gbps)	8.638	8.256
Total de tramas	73213483	69974747
Tramas erradas	0	0
Tramas incompletas	0	0
Potência ótica (dBm)	-1.60	-3.33

Tabela 32: Sumário de Resultados do Cenário híbrido ONT NG-PON2

Tramas/s	TX	RX
Atual	729571	697283
Mínimo	729571	697283
Máximo	729572	697286
Média	729572	697284
Taxa de dados	TX (Gbps)	RX (Gbps)
Atual	8.638	8.256
Mínimo	8.638	8.256
Máximo	8.638	8.256
Média	8.638	8.256

Tabela 33: Resultado das taxas do cenário híbrido ONT NG-PON2

	TX	RX
Taxa física (Gbps)	10.00	10.00
Utilização (%)	10.00	10.00
Utilização (Gbps)	1.00	1.00
Taxa de tramas (Mbps)	987.03	984.478
Taxa de dados (Mbps)	959.793	957.323
Total de tramas	10044398	10026010
Tramas erradas	0	0
Tramas incompletas	0	0
Potência ótica (dBm)	NA	NA

Tabela 34: Sumário de Resultados Cenário híbrido ONT GPON

5.1.4 Considerações Adicionais

Com este teste de *throughput* nos três diferentes cenários, é possível verificar a diferença notória de débitos *downstream* e *upstream* para as duas diferentes tecnologias, GPON e NG-PON2. Aplicando o cenário de GPON e NG-PON2 desenvolvidos neste trabalho, ao exemplo dos clientes residenciais. No caso do GPON, suporta 64 clientes, para os 2.5 Gbps

Tramas/s	TX	RX
Atual	81063	80855
Mínimo	81063	80854
Máximo	81064	80855
Média	81064	80855
Taxa de dados	TX (Mbps)	RX (Mbps)
Atual	959.793	957.322
Mínimo	959.792	957.322
Máximo	959.793	957.323
Média	959.792	957.323

Tabela 35: Resultado das taxas do cenário híbrido ONT GPON

de *downstream* da tecnologia, resultando cerca de 40 Mbps a cada cliente (cada residência), no caso de todos os clientes estarem a consumir 40 Mbits por segundo, e *upstream* de cerca de 20 Mbps, ao que isto são valores muito elevados de atingir em clientes residenciais (IPTV, 4k UHD, HSI, transferências). Aplicando este caso ao NG-PON2, com a mesma taxa por residência (solução utilizada pela MEO), é possível alimentar 1024 clientes, sendo que as mesmas taxas são possíveis *upstream* e *downstream*. Foi também possível verificar o paradigma *pay-as-you-grow*, com o cenário de coexistência, no caso business empresarial. No caso de uma pequena empresa ter uma solução à medida de GPON, e com o seu crescimento, necessitar de aumentar o numero de recursos ligados à largura de banda, como colaboradores com maior acesso à Internet e maior numero de serviços consumidores de largura de banda, com isto existindo a possibilidade de aumentar esse fornecimento, sem existir a necessidade de alterar a rede toda, apenas acrescentando material necessário na *Central Office*.

5.2 RESULTADOS RFC 2544

O seguinte teste, RFC2544, foi efetuado para a OLT, para o cliente NG-PON2 e GPON. Uma das métricas que compõe este teste, descrito na secção 4.3, é o *throughput*. Uma vez que este já foi testado anteriormente em 5.1, a apresentação dos seus resultados foi omitida nesta secção.

5.2.1 Teste de Latência

Para o teste da latência, a taxa de teste foi efetuada com a mesma taxa do *throughput*. A duração foi de 20 segundos para cada tamanho de trama de teste. Nas Figuras 41, 42 e 43 é apresentado um gráfico de linhas, que representa a latência (μ s) vs trama quanto ao tamanho (bytes). As Tabelas 36, 37 e 38 contêm o sumário do resultado do teste da

latência. A coluna da latência (μs) representa a latência do atraso de ida e volta, a da taxa (%) representa a porcentagem das tramas transmitidas (taxa de dados utilizada no teste de latência), e a do *threshold* apresenta "passou" ou "falhou", no estado do teste.

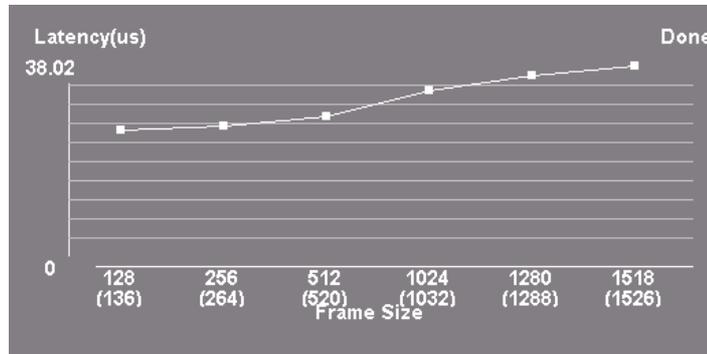


Figura 41: Latência vs tamanho de tramas para a OLT

	Latência (μs)	Taxa (%)	Thresholds
128 bytes	25.74	51.99	Passou
256 bytes	26.42	47.00	Passou
512 bytes	28.34	44.99	Passou
1024 bytes	33.20	45.00	Passou
1280 bytes	36.12	44.99	Passou
1518 bytes	38.02	46.00	Passou

Tabela 36: Sumário do teste de latência para a OLT

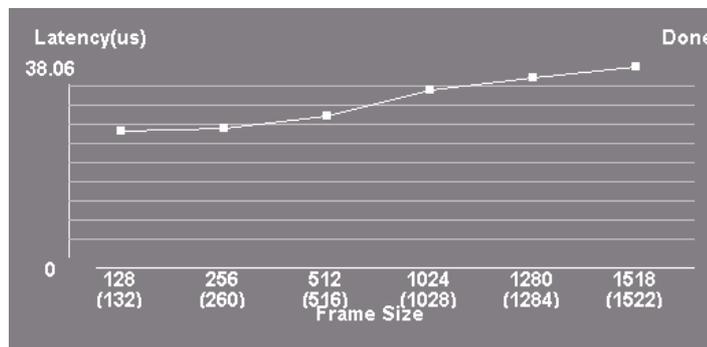


Figura 42: Latência vs tamanho de tramas para NG-PON2

	Latência (μs)	Taxa (%)	Thresholds
128 bytes	25.80	50.00	Passou
256 bytes	26.28	46.00	Passou
512 bytes	28.60	45.00	Passou
1024 bytes	33.58	45.00	Passou
1280 bytes	35.98	45.00	Passou
1518 bytes	38.06	46.00	Passou

Tabela 37: Sumário do teste de latência para NG-PON2

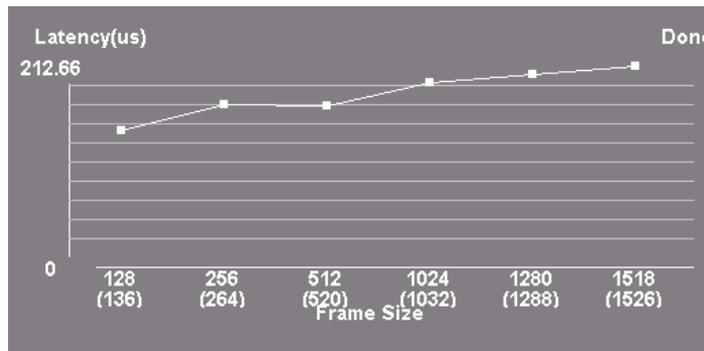


Figura 43: Latência vs tamanho de tramas para GPON

	Latência (μs)	Taxa (%)	Thresholds
128 bytes	143.46	10.00	Passou
256 bytes	171.72	10.00	Passou
512 bytes	169.90	9.997	Passou
1024 bytes	194.94	10.00	Passou
1280 bytes	203.88	10.00	Passou
1518 bytes	212.66	10.00	Passou

Tabela 38: Sumário do teste de latência para GPON

5.2.2 Teste de Jitter

No teste do *jitter*, o teste foi semelhante ao da latência. Os gráficos das Figuras 44, 45 e 46 representam a latência sob forma de gráfico de linhas como *jitter* (μs) vs tramas quanto ao tamanho (*bytes*). As Tabelas 39, 40 e 41 contêm o sumário do resultado do teste do *jitter*. A coluna *jitter* (μs) representa a medida de variação do atraso entre pacotes, a da taxa (%) representa a percentagem de tramas transmitidas (taxa de dados utilizada no teste de *jitter*), e a do *threshold* apresenta "passou" ou "falhou", no estado do teste.

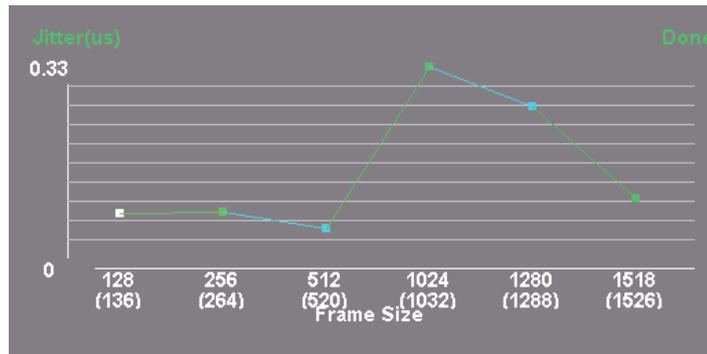


Figura 44: *Jitter* vs tamanho de tramas para a OLT

	Jitter (µs)	Taxa (%)	Thresholds
128 bytes	0.09	51.99	Passou
256 bytes	0.09	47.00	Passou
512 bytes	0.06	44.99	Passou
1024 bytes	0.33	45.00	Passou
1280 bytes	0.27	44.99	Passou
1518 bytes	0.12	46.00	Passou

Tabela 39: Sumário do teste de *jitter* para a OLT

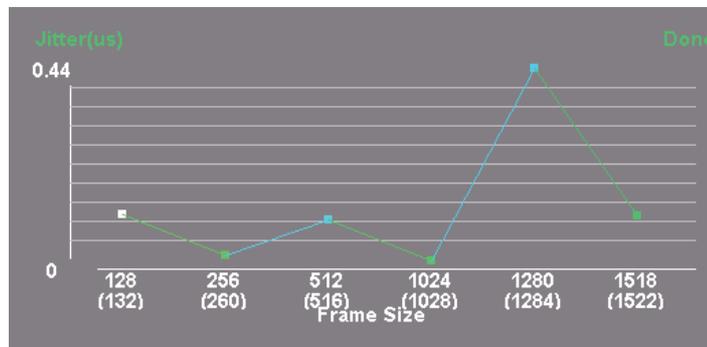
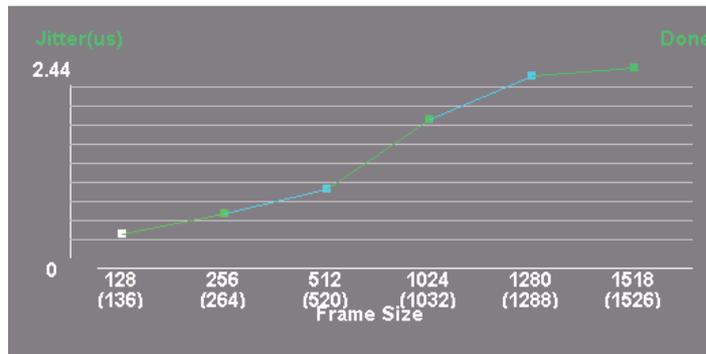


Figura 45: *Jitter* vs tamanho de tramas para NG-PON2

	Jitter (µs)	Taxa (%)	Thresholds
128 bytes	0.12	50.00	Passou
256 bytes	0.03	46.00	Passou
512 bytes	0.11	45.00	Passou
1024 bytes	0.02	45.00	Passou
1280 bytes	0.44	45.00	Passou
1518 bytes	0.12	46.00	Passou

Tabela 40: Sumário do teste de *jitter* para NG-PON2

Figura 46: *Jitter* vs tamanho de tramas para GPON

	Jitter (μ s)	Taxa (%)	Thresholds
128 bytes	0.41	10.00	Passou
256 bytes	0.65	10.00	Passou
512 bytes	0.95	9.997	Passou
1024 bytes	1.80	10.00	Passou
1280 bytes	2.34	10.00	Passou
1518 bytes	2.44	10.00	Passou

Tabela 41: Sumário do teste de *jitter* para GPON

5.2.3 Teste de Perda de Tramas

No teste de perda de tramas, foi definida uma taxa máxima (%) do total da taxa física da linha, ao qual foi atribuído sempre 100%. Esta é a taxa máxima de transmissão para executar o teste para cada tamanho de trama. A duração escolhida foi de 20 segundos. Esta duração é a quantidade de tempo do teste de *throughput* executado para cada tamanho da trama à taxa determinada. Este teste exibe a percentagem de tramas perdidas (não recebidas). As Tabelas de sumário, 42, 43 e 44, exibem o comprimento da trama, *byte size*, perda da trama do tráfego recebido (%) e a taxa transmitida (%). As Figuras 47, 48 e 49, exibem sob a forma de gráfico de linha o tamanho da trama (*bytes*) vs taxa (%).

	Perda de tramas (%)	Contagem de perda de tramas	Taxa (%)
128 bytes	0.00	0	50.00
256 bytes	0.00	0	40.00
512 bytes	0.00	0	40.00
1024 bytes	0.00	0	40.00
1280 bytes	0.00	0	40.00
1518 bytes	0.00	0	40.00

Tabela 42: Sumário do teste de perda de tramas para a OLT

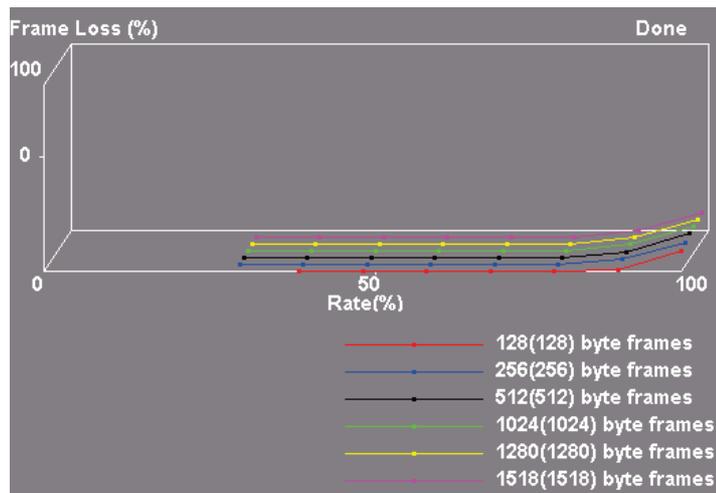


Figura 47: Perda de tramas vs taxa para a OLT

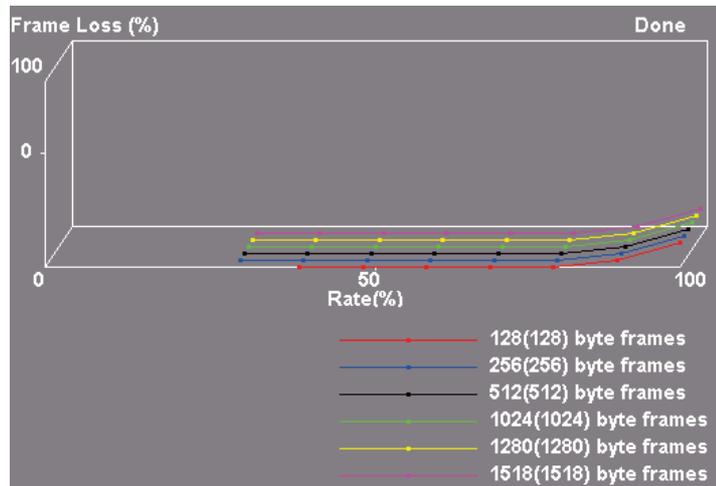


Figura 48: Perda de tramas vs taxa para NG-PON2

	Perda de tramas (%)	Contagem de perda de tramas	Taxa (%)
128 bytes	0.00	0	50.00
256 bytes	0.00	0	40.00
512 bytes	0.00	0	40.00
1024 bytes	0.00	0	40.00
1280 bytes	0.00	0	40.00
1518 bytes	0.00	0	40.00

Tabela 43: Sumário do teste de perda de tramas para NG-PON2

5.2.4 Teste de Burst

O teste de *burst* foi efetuado com uma taxa máxima de 100%, duração mínima de 2 segundos e máxima de 20 segundos (valores por defeito). Os resultados apresentados do teste

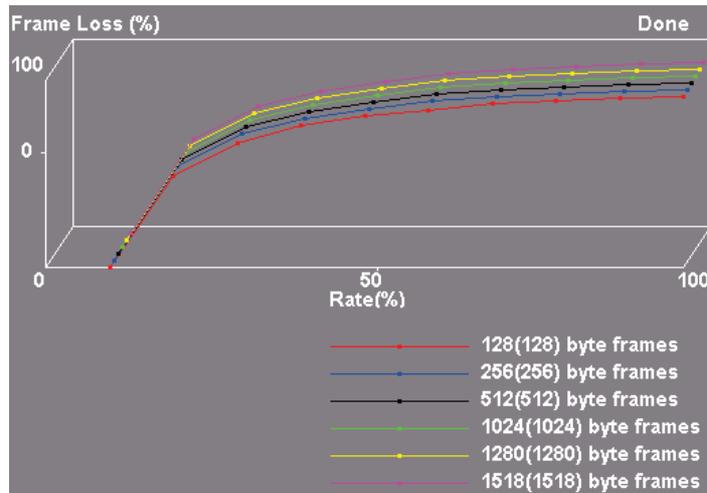


Figura 49: Perda de tramas vs taxa para GPON

	Perda de tramas (%)	Contagem média de tramas	Taxa (%)
128 bytes	0.00	0	10.00
256 bytes	0.00	0	10.00
512 bytes	0.00	0	10.00
1024 bytes	0.00	0	10.00
1280 bytes	0.00	0	10.00
1518 bytes	0.00	0	10.00

Tabela 44: Sumário do teste de perda de tramas para GPON

de *burst* são o número de tramas transmitidas/recebidas com sucesso. Nas Tabelas 45, 47 e 49, é exibida a contagem média de tramas recebidas para cada comprimento da trama. As Tabelas 46, 48 e 50, exibem a contagem média de tramas e a duração, em segundos, do comprimento da trama.

Sumário	Contagem média de tramas	Estado
128 bytes	14161181	Falhou
256 bytes	7693621	Falhou
512 bytes	4025499	Falhou
1024 bytes	2058688	Falhou
1280 bytes	1655856	Falhou
1518 bytes	1399074	Falhou

Tabela 45: Sumário do teste de *burst* para a OLT

Registo de teste	Contagem de tramas recebidas	Contagem de tramas esperada	Duração (s)
128 bytes	14161181	16891892	2
128 bytes	14161181	16891892	2
256 bytes	7693628	9057971	2
256 bytes	7693614	9057971	2
512 bytes	4025486	4699248	2
512 bytes	4025513	4699248	2
1024 bytes	2058689	2394636	2
1024 bytes	2058687	2394636	2
1280 bytes	1655858	1923076	2
1280 bytes	1655854	1923076	2
1518 bytes	1399072	1625487	2
1518 bytes	1399076	1625487	2

Tabela 46: Tabela de registos para o teste de *burst* da OLT

Sumário	Contagem média de tramas	Estado
128 bytes	14173489	Falhou
256 bytes	7705517	Falhou
512 bytes	4037228	Falhou
1024 bytes	2058863	Falhou
1280 bytes	1655992	Falhou
1518 bytes	1399191	Falhou

Tabela 47: Sumário do teste de *burst* para NG-PON2

Registo de teste	Contagem de tramas recebidas	Contagem de tramas esperada	Duração (s)
128 bytes	14173674	16891892	2
128 bytes	14173305	16891892	2
256 bytes	7705570	9057971	2
256 bytes	7705465	9057971	2
512 bytes	4037234	4699248	2
512 bytes	4037223	4699248	2
1024 bytes	2058860	2394636	2
1024 bytes	2058866	2394636	2
1280 bytes	1655995	1923076	2
1280 bytes	1655989	1923076	2
1518 bytes	1399195	1625487	2
1518 bytes	1399187	1625487	2

Tabela 48: Tabela de registos para o teste de *burst* para NG-PON2

Sumário	Contagem média de tramas	Estado
128 bytes	1647184	Falhou
256 bytes	895164	Falhou
512 bytes	468636	Falhou
1024 bytes	239663	Falhou
1280 bytes	192818	Falhou
1518 bytes	162869	Falhou

Tabela 49: Sumário do teste de *burst* para GPON

Registo do teste	Contagem de tramas recebidas	Contagem de tramas esperada	Duração (s)
128 bytes	1647176	16891892	2
128 bytes	1647193	16891892	2
256 bytes	895167	9057971	2
256 bytes	895161	9057971	2
512 bytes	468637	4699248	2
512 bytes	468636	4699248	2
1024 bytes	239662	2394636	2
1024 bytes	239665	2394636	2
1280 bytes	192820	1923076	2
1280 bytes	192817	1923076	2
1518 bytes	162871	1625487	2
1518 bytes	162868	1625487	2

Tabela 50: Tabela de registos para o teste de *burst* para GPON

CONCLUSÃO

Ao longo da dissertação foi apresentado, objetivado e explicado todo o trabalho desenvolvido. Neste capítulo serão abordadas as conclusões do trabalho desenvolvido em resposta aos objetivos propostos. Será feita uma síntese de cada etapa de trabalho. Por fim serão projetadas algumas ideias a considerar como trabalho futuro.

6.1 CONCLUSÕES

Como está descrito no primeiro capítulo desta dissertação, o principal objetivo deste trabalho é chegar a uma nova arquitetura da tecnologia NG-PON2, com o propósito de aplicar em *Central Offices*, de empresas e clientes do grupo Altice, como por exemplo MEO, Altice US, SFR, Verizon, etc. Existindo também outros objetivos, como o estudo da diferença entre as tecnologias GPON e NG-PON2.

De forma a criar uma base de conhecimento para a colmatação dos objetivos definidos, foram estudados os vários conceitos associados às redes de acesso, redes óticas passivas, conceito de FTTx, nomeadamente FTTH, determinados conceitos óticos. Foram ainda estudadas tecnologias PON de legado como as normas GPON e XG-PON, e a técnica TWDM.

No capítulo da prototipagem e implementação, onde foi pensada, projetada e especificada a arquitetura a apresentar. Foram criados três cenários de redes de acesso diferentes, GPON, NG-PON2 e híbrido, gozando este último de uma grande vantagem do NG-PON2, a coexistência com tecnologias de legado. Os três cenários diferentes tiveram como objetivo a verificação e estudo de diferenças entre tecnologias, em uso atualmente e de futuro.

No capítulo seguinte foram descritos os testes efetuados. Os testes foram efetuados com recurso a um gerador de tráfego. A principal característica do NG-PON2 são as suas elevadas taxas de *downstream* e *upstream*, sendo que, para testar estas taxas, bem como as dos cenários em comparação, foi efetuado um teste de *throughput*. Este teste consistiu em gerar tráfego constante de ambos os lados, cliente e ISP, analisando a taxa de dados e de tramas. Neste teste os resultados obtidos foram muito próximos dos esperados, sendo que as taxas observadas vão de acordo com o que está anunciado nas normas. O segundo

teste efetuado foi RFC2544, que consiste numa metodologia de avaliação comparativa para dispositivos de interligação de rede. Nesta referência foi testada a latência, *jitter*, perda de tramas e o *burst (back-to-back)*.

Com a realização destes testes foi possível verificar grandes diferenças entre NG-PON2 e GPON. Foi possível verificar a coexistência entre tecnologias PON diferentes. Contudo, foi concluído o objetivo principal e foi conseguida uma solução para uma arquitetura NG-PON2 funcional e aplicável num futuro muito próximo.

Esta arquitetura tem como características principais (as quais não estavam presentes em tecnologias de legado): atualização incremental de largura de banda (*pay-as-you-grow*), balanceamento de carga sob canais para comprimentos de onda congestionados, suspensão seletiva de portas na OLT para economia de energia durante períodos de baixo tráfego, resiliência contra falhas do transceiver da OLT através de reajuste no ONU, atribuição rápida e dinâmica de comprimentos de onda para melhorar a eficiência da utilização da largura de banda.

6.2 TRABALHO FUTURO

Apesar dos objetivos principais e secundários serem conseguidos, existe mais trabalho que poderia ser elaborado na continuidade deste. Uma das melhorias a desenvolver seria um cenário mais completo e mais próximo ao real, na qual fosse possível, ao invés de recorrer a um gerador de tráfego para simular comunicações, utilizar serviços reais. Este cenário poderia também conter mais que uma carta TTo4SXG e mais que um comprimento de onda, no mínimo 4, em que se pudesse aplicar um sistema de redundância, e utilizar também as tecnologias XG-PON (ou XGS-PON) e *RF-Overlay*. Na Figura 50 está representado o cenário considerado.

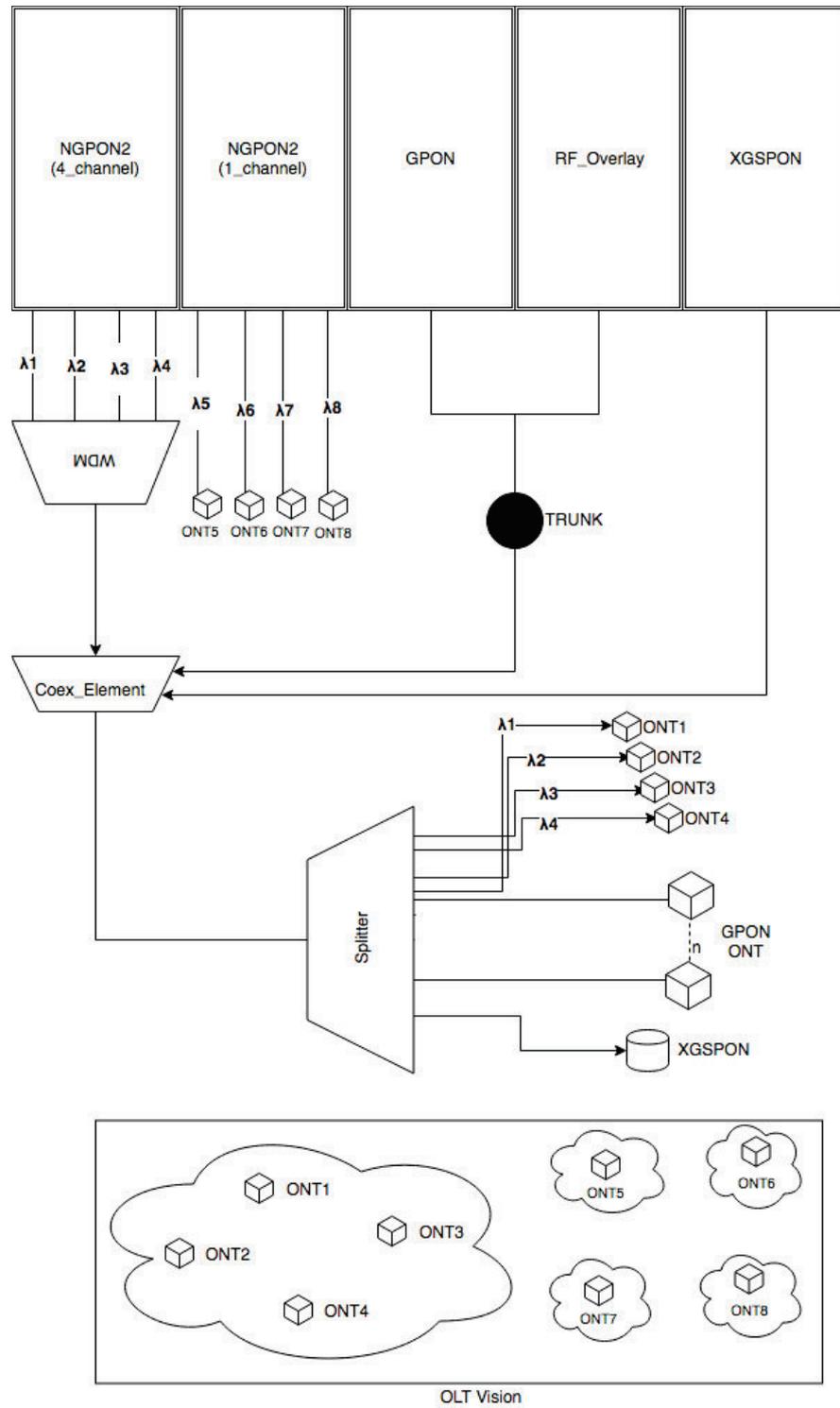


Figura 50: Cenário NG-PON2 a desenvolver em trabalho futuro

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cisco. Cisco visual networking index: Forecast and methodology, 2016–2021. junho 2017. Acedido em dezembro de 2017.
- [2] José Salgado, Jan Dewinter, Vitor Goncalves, Mike Harrop, Ed Harstead, Martin Knocke, Mirko Knöfel, Jerome Laferriere, Raf Meersman, Alain Meller, Jiri Vyslouzil, and Rong Zhao. *FTTH Handbook*. Eileen Connolly Bull, Connolly Ccommunication AB, 7th edition, 2016.
- [3] Kerry Zhang. *Understanding the Split Ratios and Splitting Level of Optical Splitters*, novembro 2016. Acedido em dezembro de 2017.
- [4] Kota Asaka and Jun ichi Kani. Standardization trends for next-generation passive optical network stage 2 (ng-pon2). *Global Standardization Activities*, 13(3):1–5, 3 2015.
- [5] Tommaso Muciaccia, Fabio Gargano, and Vittorio M.N. Passaro. Passive optical access networks: State of the art and future evolution. *Photonics*, 1:323–346, 12 2014.
- [6] Amit N. Bhagat. *GPON Fundamentals*. Acedido em janeiro de 2018.
- [7] Amirthanathan Prashanthan. *NG-PON 2 (Next Generation- Passive Optical Network 2 - 40 Gbps Capable)*, abril 2017. Acedido em dezembro de 2017.
- [8] Optoplex Corporation. *10Gbps Tunable ROSA for NGPON2*. Acedido em dezembro de 2017.
- [9] Yuanqiu Luo, Xiaoping Zhou, Frank Effenberger, Xuejin Yan, Guikai Peng, Yinbo Qian, and Yiran Ma. Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (twdm-pon) for next-generation pon stage 2 (ng-pon2). *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, (4), fevereiro 2013.
- [10] John E. Mitchell. Integrated wireless backhaul over optical access networks. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, (20), outubro 2014.
- [11] Televes. *EN GPON OLT: 8xPON + 8xGbE + 2x10GbE - User Manual*, ref. 769401 edition.
- [12] ZTE Enterprises. Gigabit access era is coming, agosto 2016. Acedido em junho de 2018.
- [13] Fater Company. Optical fiber. Acedido em junho de 2018.

- [14] Dasolink. Gpon sfp olt onu. Acedido em junho de 2018.
- [15] Altice Labs. Pon open your network to the future. Acedido em junho de 2018.
- [16] European Telecommunications Standards Institute ETSI. Transmission and multiplexing (tm); optical distribution network (odn) for optical access network (oan). (ETS 300 681), junho 1997.
- [17] Telecommunication Standardization Sector of ITU ITU-T. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Long reach*. julho 2010.
- [18] LTD. HUAWEI TECHNOLOGIES CO. *Next-Generation PON Evolution*, version no.: m3-013030802-20100925-c-1.0 edition, 2010.
- [19] Altice Labs. *NG-PON2 - Single Technology Platform for all Services*. Acedido em dezembro de 2017.
- [20] Dr. Afif Osseiran. Mobile and wireless communications system for 2020 and beyond (5g). ITU-R 2020 Vision Workshop, Vietnam, 2014. Acedido em dezembro de 2017.
- [21] Ericsson. Ericsson mobility report, on the pulse of the networked society, 2014. Acedido em dezembro de 2017.
- [22] Cláudio Rodrigues, Tiago Miguel Mendes, José Miguel Lima, Simão Oliveira Cardeal, and Paulo Mão-Cheia. *NG-PON2 Optical Tests - NG-PON2 white paper*. PT Inovação, 2015.
- [23] Tiago Miguel Mendes, Cláudio Rodrigues, Francisco Manuel Ruivo, Paulo Mão-Cheia, and José Salgado. *NG-PON2 - Access, Passive optical networks, time and wavelength, division multiplexing*. PT Inovação.
- [24] Pedro Miguel Dias. *Convergência em redes de acesso de nova geração*. Master's thesis, Universidade de Aveiro - Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática, 2015.
- [25] TE Connectivity. *FTTx Architecture - Central Office and Splitters*. Acedido em dezembro de 2017.
- [26] Gianfranco Ciccarella, Clelia Lorenza Ghibaudo, and Fabrizio Guarino. *NGAN NEL MONDO: PIANI E SOSTENIBILITÀ ECONOMICA*. Notiziario Tecnico, Telecom Italia, fevereiro 2012.

- [27] Dimitris Katsianis, Theodoros Rokkas, Ioannis Neokosmidis, Markos Tselekounis, Dimitris Varoutas, Ioannis Zacharopoulos, and Apostolia Bartzoudi. Risks associated with next generation access networks investment scenarios. *IEEE Network*, pages 11–17, julho 2012.
- [28] Anupam Banerjee and Marvin Sirbu. Towards a technologically and competitively neutral fiber-to-the-home (ftth) infrastructure. In I. Chlamtac, A. Gumaste, and C. Szabó, editors, *Broadband Services: Business Models and Technologies for Community Networks*, chapter 119-139, pages 43–75. John Wiley Sons, Ltd, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 2005.
- [29] TE Connectivity. Broadband network solutions -ftth architecture white paper series - ftth architecture overview, junho 2015.
- [30] C.P. Larsen, A. Gavler, and K Wang. Comparison of active and passive optical access networks. In Proceedings of the 9th Conference on Telecommunications Internet and Media Techno Economics (CTTE), junho 2010.
- [31] The Fiber Optic Association Inc. *User's Guide To Fiber Optics - Technical Bulletin*, 2014.
- [32] J. Casier, K.and Vanhaverbeke and J.and Verbrugge S.and Meersman R.and Colle D.and Pickavet M.and Demeester P. Lannoo, B.and van Ooteghem. Economics of ftth: A comparative study between active and passive optical networks. In Proceedings of the 48th FITCE Congress, setembro 2009.
- [33] M. Kantor, K. Wajda, B. Lannoo, K. Casier, S. Verbrugge, M. Pickavet, L. Wosinska, J. Chen, and A. Mitcsenkov. General framework for techno-economic analysis of next generation access networks. In Proceedings of the 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), junho 2010.
- [34] Yiran Ma and Zhensheng Jia. Evolution and trends of broadband access technologies and fiber-wireless systems. In M. Tornatore et al., editor, *Fiber-Wireless Convergence in Next-Generation Communication Networks*, chapter 2, pages 43–75. Springer International Publishing, Switzerland, 2017.
- [35] International Telecommunication Union ITU-T. Broadband optical access systems based on passive optical networks (pon). 2005.
- [36] Computer Society IEEE. Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (csma/cd) access method and physical layer specifications amendment: Media access control parameters, physical layers, and management parameters for subscriber access networks. setembro 2004.

- [37] Computer Society IEEE. Local and metropolitan area networks - part 3: Cdma/cd access method and physical layer specifications amendment 1: Physical layer specifications and management parameters for 10 gb/s passive optical networks. outubro 2009.
- [38] TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR ITU ITU-T. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics*. International Telecommunication Union, 2008.
- [39] Telecommunication Standardization Sector of ITU ITU-T. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS - Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements*. Switzerland, Geneva, 2 edition, março 2016.
- [40] Eng. Manuel Osorio Zuleta. *CCAT CONSULTORES - Entendendo os Módulos B+ e C+*, maio 2016. Acedido em dezembro de 2017.
- [41] Hu Zhang, Xiaoguang Zhang, Yifan Deng, Lixia Xi, Xianfeng Tang, and Wenbo Zhang. The orbital angular momentum modes supporting fibers based on the photonic crystal fiber structure. *Crystals*, outubro 2017.
- [42] Derek Nisset. Ng-pon2 technology and standards. *Journal of Lightwave Technology*, 33:1136–1143, março 2015.
- [43] Martin Carroll, Derek Nisset, and Peter Dawes. Fsan highlights ng-pon2 standards update. In *Proceedings of the FSAN and IEEE NG-EPON/1904 ANWG Joint Session*, fevereiro 2015.
- [44] Yiran Ma, Yinbo Qian, Guikai Peng, Xiaoping Zhou, Xiaomu Wang, Jingwen Yu, Yuanqiu Luo, Xuejin Yan, and Frank Effenberger. Demonstration of a 40gb/s time and wavelength division multiplexed passive optical network prototype system. *Optical Society of America, (PDP5D.7)*, 2012.
- [45] Telecommunication Standardization Sector of ITU ITU-T. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS - Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms*. Switzerland, Geneva, 1 edition, outubro 2015.

- [46] Telecommunication Standardization Sector of ITU ITU-T. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Digital - sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*. Switzerland, Geneva, 1 edition, março 2013.
- [47] Telecommunication Standardization Sector of ITU ITU-T. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS - Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Transmission convergence layer specification*. Switzerland, Geneva, 1 edition, outubro 2015.
- [48] Yuanqiu Luo, Hal Roberts, Klaus Grobe, Maurizio Valvo, Derek Nettet, Kota Asaka, Harald Rohde, Joe Smith, Jun Shan Wey, and Frank Effenberger. Physical layer aspects of ng-pon2 standards - part 2: System design and technology feasibility [invited]. *J. OPT. COMMUN. NETW.*, 8(1):43–52, janeiro 2016.
- [49] Min Zhua, Shilin Xiao, Zhao Zhou, Wei Guo, Lilin Yi, He Chen, Jie Shi, and Weisheng Hu. Upstream multi-wavelength shared pon with wavelength-tunable self-seeding fabry-perot laser diode. *OSA/OFC/NFOEC*, outubro 2011.
- [50] Di Liang, Marco Fiorentino, Sudharsanan Srinivasan, John E. Bowers, and Raymond G. Beausoleil. Low threshold electrically-pumped hybrid silicon microring lasers. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, (6), novembro 2011.
- [51] Akifumi Kato, Katsumi Nakatsuhara, and Takakiyo Nakagami. Tunable optical filter with cascaded waveguide fabry-pérot resonators featuring liquid crystal cladding. *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, (4), fevereiro 2012.
- [52] Robert Murano, Wayne F. Sharfin, and Michael J. Cahill. Tunable 2.5gb/s receiver for wavelength-agile dwdm-pon. In *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference*, page PDP32. Optical Society of America, 2008.
- [53] G. W. Yoffe, S. Y. Zou, S. A. Rishton, R. W. Olson, M. A. Emanuel, and B. Pezeshki. Widely-tunable 30mw laser source with sub-500khz linewidth using dfb array. In *LEOS 2008 - 21st Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, pages 892–893, novembro 2008.
- [54] D. Ton, G. W. Yoffe, J. F. Heanue, M. A. Emanuel, S. Y. Zou, J. Kubicky, B. Pezeshki, and E. C. Vail. 2.5-gb/s modulated widely tunable laser using an electroabsorption modulated dfb array and mems selection. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(6):1573–1575, junho 2004.

- [55] Yiran Liu, A. R. Davies, J. D. Ingham, R. V. Penty, and I. H. White. Uncooled dbr laser directly modulated at 3.125 gb/s as athermal transmitter for low-cost wdm systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(10):2026–2028, outubro 2005.
- [56] Peter Ossieur, Cleitus Antony, Alan Naughton, Aisling M. Clarke, Heinz-Georg Krimmel, Xin Yin, Xing-Zhi Qiu, Colin Ford, Anna Borghesani, David Moodie, Alistair Poustie, Richard Wyatt, Bob Harmon, Ian Lealman, Graeme Maxwell, Dave Rogers, David W. Smith, Sylvia Smolorz, Harald Rohde, Derek Nasset, Russell P. Davey, and Paul D. Townsend. Demonstration of a 32 × 512 split, 100 km reach, 2 × 32 × 10 gb/s hybrid dwdm-tdma pon using tunable external cavity lasers in the onus. *J. Lightwave Technol.*, 29(24):3705–3718, dezembro 2011.
- [57] F. Wei, Y. Sun, D. Chen, G. Xin, Q. Ye, H. Cai, and R. Qu. Tunable external cavity diode laser with a plzt electrooptic ceramic deflector. *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(5):296–298, março 2011.
- [58] J. Zheng, C. Ge, C. J. Wagner, L. Meng, B. T. Cunningham, and J. G. Eden. Optically tunable ring external-cavity laser. In *IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting*, pages 644–645, outubro 2011.
- [59] Markku Kojo Kumiko Ono Martin Stiemerling Lars Eggert Alexey Melnikov Wes Eddy Alexander Zimmermann Brian Trammell Joe Touch; Eliot Lear, Allison Mankin and Jana Iyengar. Service name and transport protocol port number registry, maio 2018.
- [60] The Broadband Forum. Tr-352 multi-wavelength pon inter-channel-termination protocol (ictp) specification, março 2017.
- [61] Michael Yan. *SONET/SDH Essentials - WHITE PAPER*, volume 1. 2008.
- [62] Bruce S. Davie and Yakov Rekhter. *MPLS: Technology and Applications*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1st edition, 2000.
- [63] Telecommunication Standardization Sector of ITU ITU-T. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Reach extension*. agosto 2008.
- [64] Telecommunication Standardization Sector of ITU ITU-T. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS - Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification Amendment 2*. Switzerland, Geneva, 1.2 edition, agosto 2017.

- [65] RS. Bradner and J. McQuaid. Benchmarking methodology for network interconnect devices. Technical Report 2544, The Internet Society - Network Working Group, março 1999.

