



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

**Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e
Telecomunicações e de Computadores**

Avaliação do Consumo Energético de uma Rede de Acesso

Celso José Monteiro Alice
(Licenciado)

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Eletrónica e
Telecomunicações

Orientador: Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Júri: Prof. Doutor Mário Pereira Véstias

Vogal: Prof. Doutor Mário José Neves de Lima

Vogal: Prof. Doutor Pedro Renato Tavares Pinho

Julho 2016

Resumo

O tráfego de *internet* está a crescer de forma exponencial e assim irá continuar nos próximos anos. Este crescimento é guiado por um conjunto de fatores, entre os quais está o aumento de utilizadores e o aparecimento de novos serviços e aplicações com elevados requisitos de largura de banda. A medida que o tráfego cresce, a quantidade, a capacidade, o custo e consumo energético dos equipamentos necessários para distribuir o tráfego também cresce, como resultado, a contribuição do setor das telecomunicações para consumo de energia a nível mundial aumentou consideravelmente na última década. Sendo o consumo energético um elemento importante para o OPEX (*Operational Expenditure*), consequentemente, em adição aos habituais cálculos de capacidade, *throughput* e QoS (*Quality of Service*), que impactuam o CAPEX (*Capital Expenditure*), é importante tê-lo em conta no momento de decidir que tecnologia adotar, no entanto o consumo energético ainda é geralmente ignorado no debate sobre a implementação da rede.

Neste trabalho, dois modelos de avaliação do consumo energético de uma rede de acesso, que se focam no desempenho energético dos dispositivos ativos na rede de acesso, são analisados e aplicados a um conjunto de tecnologias de rede óticas atuais e futuras selecionadas para o estudo. Inicialmente os modelos são aplicados a uma rede com rácio de divisão de 1:64 e capaz de servir 16384 utilizadores. De seguida, os modelos são novamente aplicados, agora com os rácios de divisão ajustados de forma a se obter o máximo rendimento de cada tecnologia ótica. Desse modo, o consumo de energia das diversas tecnologias de redes de acesso de próxima geração é avaliado, bem como em que situações podem ser extraídos o máximo potencial das mesmas.

Os cálculos são realizados através da ferramenta Matlab, num estado estático global da rede. Depois de avaliar os resultados, são tiradas conclusões sobre as diferenças no consumo de energia. Destaca-se, portanto, o efeito sobre o consumo de energia da tecnologia e o desempenho a longo prazo bem como as diferenças entre os modelos.

Palavras-chave

Eficiência energética, Consumo energético, Rede de acesso, OPEX, CAPEX.

Abstract

The Internet traffic is growing exponentially and so will continue in the coming years. This growth is guided by a number of factors, among which are an increase in users and the appearance of new services and applications with high bandwidth requirements. As traffic grows, the quantity, capacity, cost and power consumption of the equipment needed to deliver traffic also grows as a result, the contribution of the telecommunications sector to energy consumption worldwide has increased considerably in the last decade. As the energy consumption an important element in the OPEX, consequently, in addition to the usual calculations of capacity, throughput and QoS, which influence CAPEX, it is important to take it into account when deciding to adopt technology, but energy consumption is still generally ignored in the debate on the implementation of the network.

In this study, two models of the energy consumption of an access network, which focus the energy performance of the active devices in access network are analyzed and applied to a current set of optical network technologies and future selected for the study. Initially the models are applied to a network with a 1:64 split ratio and capable of serving 16384 users. Then, the templates are reapplied, now with the division ratios adjusted to obtain the maximum yield of each optical technology. Thus, the power consumption of the various technologies of the next generation access networks is evaluated, and in which situations can be extracted from the full potential thereof.

Calculations are performed by Matlab, in a global static state of the network. After evaluating the results, conclusions are drawn about the differences in energy consumption. It is noteworthy, therefore, the effect on the power consumption of the technology and the long-term performance as well as differences between models.

Keywords

Energy efficiency, Energy consumption, Access networks, OPEX, CAPEX.

Agradecimentos

O trabalho descrito nesta dissertação contou com o apoio e colaboração de várias pessoas as quais pretendo endereçar o meu reconhecimento.

Quero expressar o meu profundo agradecimento ao Professor Pedro Pinho, meu orientador, pelos conhecimentos partilhados bem como pela disponibilidade e confiança depositada, que levaram a realização desta dissertação. Saliento as suas críticas e comentários pertinentes e a cuidada supervisão científica do meu trabalho.

Aos meus pais, H. Alice e E. Alice, pela educação, espírito de sacrifício e pelo apoio incondicional para que atingisse mais um objetivo, o meu carinhoso obrigado. À minha irmã, A. Alice, agradeço a inabalável crença nas minhas capacidades. Às minhas queridas avós Domingas Santana e Maria Alice, que infelizmente já não se encontram entre nós, agradeço pelo amor, fé nas minhas realizações e conselhos.

À V. Benýsková pelo apoio, confiança, motivação, exigência e pelo espírito crítico nesta importante etapa da minha vida, o meu especial agradecimento.

Ao meu melhor amigo, Eng.º T. Cabrita, sempre presente e disponível, pelo companheirismo e partilha de conhecimentos, o meu obrigado. À Sr.ª L. Cabrita, pela marcada presença na minha educação na fase infantil e juvenil, o meu eterno agradecimento.

A todos os meus amigos, agradeço a compreensão que tiveram durante o desenrolar desta dissertação, percebendo e aceitando as minhas ausências, em particular ao longo deste último ano.

Índice

<i>Lista de Figuras</i>	<i>xi</i>
<i>Lista de Tabelas</i>	<i>xv</i>
<i>Lista de Acrónimos</i>	<i>xvii</i>
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e motivação	10
1.2. Objetivos e Contribuições	11
1.3. Organização	13
2. Redes de Telecomunicações de Nova Geração	15
2.1. Planos Funcionais das Redes de Nova Geração	16
2.1.1. Rede Core	17
2.1.2. Rede Metro	18
2.1.3. Rede de Acesso	18
2.2. Tecnologias em Análise	20
2.3. Tecnologias não Elegíveis para a Análise	22
2.4. Taxonomia das Arquiteturas FTTX	23
2.4.1 FTTN/FTTCab – Fiber to the Node ou Fiber to the Cabinet	24
2.4.2 FTTC – Fiber to the Curb	24
2.4.3 FTTB/FTTP – Fiber to the Building ou Fiber to the Premise	25
2.4.4 FTTH – Fiber to the Home	25
2.5 Topologias P2P e P2MP	26
2.6 Redes AON e Redes PON	27
2.7. Tecnologias na Rede de Acesso Ótica	29
2.7.1. Tecnologias PON do Grupo FSAN/ITU-T	30
2.7.1.1. APON e BPON ITU-T G.983	30
2.7.1.2. GPON ITU-T G.984 Series	30
2.7.1.3. XG-PON (10G-PON) ITU-T G.987 Series	33
2.7.1.4. NG-PON2 (TDWM-PON) ITU-T G.989 Series	34
2.7.2. Tecnologias PON do Grupo IEEE	38
2.7.2.1 EPON IEEE 802.3ah	38
2.7.2.2. 10G-EPON IEEE 802.3av	40

2.7.3. Tecnologias AON do Grupo IEEE	43
2.7.3.1. P2P Ethernet (“Home Run” Ethernet)	43
2.7.3.2. Active Ethernet (“Active” Ethernet)	43
2.8. Resumo das Tecnologias na Rede de Acesso Ótica	45
3. Fatores Influentes para o Consumo Energético	47
3.1. Tráfego de Dados	47
3.2. Equipamentos de Rede	49
3.3. Design de Rede	56
4. Avaliação do Consumo Energético	65
4.1. Modelo de cálculo do consumo energético I	66
4.1.1. Metodologia Modelo I	67
4.1.2. Resultados Modelo I	68
4.1.2.1. Rácio de divisão fixo 1:64	69
4.1.2.2. Rácio de divisão otimizado	72
4.2. Modelo de cálculo do consumo energético II	77
4.2.1. Metodologia Modelo II	78
4.2.2. Resultados Modelo II	80
4.2.2.1. Rácio de divisão fixo 1:64 (16384 utilizadores)	80
5. Conclusão e Trabalho Futuro	85
5.1. Conclusão	85
5.2. Trabalho Futuro	88
Referências	91

Lista de Figuras

<i>Figura 1.1. – Depleção entre volume de tráfego e as receitas do operador. (Fonte: Accenture, 2015)</i>	2
<i>Figura 1.2. – Crescimento global do tráfego IP. (Fonte: Cisco - VNI 2015)</i>	3
<i>Figura 1.3. – Crescimento global do número de dispositivos ligados. (Fonte: Cisco - VNI 2015)</i>	4
<i>Figura 1.4. – Tráfego IP global, por tipo de dispositivo. (Fonte: Cisco - VNI 2015)</i>	5
<i>Figura 1.5. – Tráfego Internet global, por tipo de dispositivo. (Fonte: Cisco - VNI 2015)</i>	5
<i>Figura 1.6. – Aumento da definição vídeo. (Fonte: Cisco - VNI 2015)</i>	6
<i>Figura 1.7. – Tráfego global vídeo 4K. (Fonte: Cisco - VNI 2015)</i>	6
<i>Figura 1.8. – Investimento mundial previsto em tecnologias PON em 2015. (Fonte: Ericsson - Energy and Carbon Report, 2014)</i>	8
<i>Figura 1.9. – Total de emissões de GHG em ICT fixas. (Fonte: Ericsson - Energy and Carbon Report, 2014)</i>	11
<i>Figura 1.10 – Pirâmide de consumo energético dos operadores. (Fonte: Society of Cable Telecommunications Engineers, 2015)</i>	12
<i>Figura 2.1. – Planos funcionais de uma rede de telecomunicações. (Fonte: Logtel, 2011)</i>	19
<i>Figura 2.2. – Arquiteturas FTTX. (Fonte: COMSOF, 2013)</i>	23
<i>Figura 2.3. – Modelo típico de uma Rede de Acesso FTTH. (Fonte: Univ. Madrid - “Contribution to energy consumption modelling”, 2013)</i>	26
<i>Figura 2.4. – Diagrama de soluções FTTH em estudo.</i>	26
<i>Figura 2.5. – Arquitetura AON. (Fonte: RF Wireless World, 2015)</i>	28
<i>Figura 2.6. – Arquitetura PON. (Fonte: RF Wireless World, 2015)</i>	28
<i>Figura 2.7. – Modelo de rede de acesso GPON. (Fonte: RF Wireless World, 2015)</i>	31
<i>Figura 2.8. – Tráfego TDM downstream (broadcast) e TDMA upstream em GPON. (Fonte: Electronicdesign, 2007)</i>	32

Figura 2.9. – Encapsulamento GPON. (Fonte: ALU - GPON Fundamentals, 2012)	33
Figura 2.10. – Coexistência GPON e XG-PON. (Fonte: ALU - GPON Training 1)	34
Figura 2.11. – Principais candidatos a NG-PON2. (Fonte: ALU - Active Technologies, The Sky is the limit, 2012)	35
Figura 2.12. – Tecnologia TWDM. (Fonte: ALU - Active Technologies, The Sky is the limit, 2012)	36
Figura 2.13. – Coexistência NG-PON2 com tecnologias PON anteriores. (Fonte: Joint ITU/IEE - Progress in Optical Access,, 2012)	36
Figura 2.14. – Comprimentos de onda das tecnologias PON atuais. (NTT - Standardization Trends for NG-PON2, 2014)	37
Figura 2.15. – Downstream em EPON. (Fonte: H. Fawsi - Optical networking technologies, 2012)	39
Figura 2.16. – Upstream em EPON. (Fonte: H. Fawsi - Optical networking technologies, 2012)	40
Figura 2.17. – Coexistência tecnologias EPON e 10G-EPON. (Fonte: NEC, 2015)	41
Figura 2.18. – Plano de λ: EPON e 10G-EPON. (Fonte: Zeitgeist Optical Laboratory - EPON, 2016)	41
Figura 2.19. – AON: Home run e Active star. (Fonte: FTTH Council – Next Generation AON, 2011)	44
Figura 3.1. – OLT Cisco ME 4600. (Fonte: Cisco, 2016)	51
Figura 3.2. – Módulo Switch Fabric. (Fonte: Cisco, 2016)	52
Figura 3.3. – Módulo de acesso PON. (Fonte: Cisco, 2016)	52
Figura 3.4. – Módulo de Uplink. (Fonte: Cisco, 2016)	52
Figura 3.5. – Módulo de Acesso Ethernet. (Fonte: Cisco, 2016)	53
Figura 3.6. – Cisco ME 4620 ONT-SFU. (Fonte: Cisco, 2016)	55
Figura 3.7. – Topologia Tipo A. (Fonte: PT, 2012)	59
Figura 3.8. – Topologia Tipo B. (Fonte: PT, 2012)	60

<i>Figura 3.9. – Topologia Tipo C. (Fonte: PT, 2012)</i>	61
<i>Figura 3.10. – Esquema de Rede Centralizada flexível. (Fonte: PT, 2012)</i>	62
<i>Figura 4.1. – Sequência para a avaliação do consumo energético.</i>	65
<i>Figura 4.2. – Esquemático dos componentes responsáveis pelo consumo de energia.</i>	66
<i>Figura 4.3. – Largura de banda por utilizador, em rácio 1:64.</i>	69
<i>Figura 4.4. – Comportamento da largura de banda com o aumento de utilizadores na PON, em rácio 1:64.</i>	70
<i>Figura 4.5. – Consumo dos três componentes principais do OLT, em rácio 1:64.</i>	71
<i>Figura 4.6. - Largura de banda por utilizador, em rácio optimizado.</i>	73
<i>Figura 4.7. - Consumo dos principais componentes do OLT, em rácio optimizado.</i>	73
<i>Figura 4.9. - Consumo dos três componentes principais do OLT, em rácio optimizado.</i>	74
<i>Figura 4.10. - Consumo dos três componentes principais do OLT, em rácio optimizado.</i>	75
<i>Figura 4.11. - Consumo do OLT e do ONT, em rácio optimizado.</i>	76
<i>Figura 4.12. - Visão esquemática das variantes das redes de acesso FTTH.</i>	77
<i>Figura 4.13. – P2P e AON para área de 16384 utilizadores.</i>	81
<i>Figura 4.14. – PON para área de 16384 utilizadores.</i>	82
<i>Figura 4.15. – AON, P2P e PON para área de 16384 utilizadores.</i>	83

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1. – Sumarização das soluções técnicas a comparar.</i>	21
<i>Tabela 2.2. – Comparação AON vs. PON.</i>	29
<i>Tabela 2.3. – Perdas mínimas e máximas permitidas para redes PON.</i>	31
<i>Tabela 2.4. – Tipo de OLT e ONU suportadas.</i>	42
<i>Tabela 2.5. – Quadro resumo classes EPON.</i>	42
<i>Tabela 2.6. – Quadro resumo buget ótico.</i>	42
<i>Tabela 2.7. – Quadro resumo tecnologias em análise.</i>	46
<i>Tabela 3.1. – Tráfego IP, 2014 – 2019</i>	48
<i>Tabela 3.2. – Chassis Cisco ME 4620 OLT [22].</i>	53
<i>Tabela 3.3. – Características de potência OLT Cisco ME 4620 [22].</i>	54
<i>Tabela 3.4. – Resumo capacidade da OLT Cisco ME 4620 [22].</i>	54
<i>Tabela 3.5. – Valores de consumo para OLTs, por porto [23].</i>	54
<i>Tabela 3.6. – Valores de consumo para ONT [23].</i>	55
<i>Tabela 3.7. – Valores de consumo para interfaces Uplink, por porto.</i>	56
<i>Tabela 3.8. - Valores de consumo de energia ONUs e portos OLT GPON e Ethernet.</i>	56
<i>Tabela 3.9. – Resumo Topologias de Rede</i>	61
<i>Tabela 3.10. – Link Budget ODN de categoria B+.</i>	63
<i>Tabela 4.1. – Tecnologias elegíveis para análise com o Modelo I.</i>	68
<i>Tabela 4.2. – Consumo OLT Modelo I.</i>	72
<i>Tabela 4.3. – Tecnologias elegíveis para análise com o Modelo II.</i>	80
<i>Tabela 4.4. – Potência OLT e Débito OLT para 16384 utilizadores.</i>	80

Lista de Acrónimos

10G-EPON	10 Gigabit EPON
3D Television	3 Dimensional Television
3G	3 rd Generation
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AON	Active Optical Network
APON/ATMPON	Asynchronous Transfer Mode PON
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BNG	Broadband Network Gateway
BPON	Broadband PON
BRAS/B-RAS/BBRAS	Broadband Remote Access Server
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CAPEX	Capital Expenditure
CATV	Cable Television
CO	Central Office
CPE	Costumer Premises Equipment
CSM	Control and Switch Module
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DMA	Digital Media Adapter
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EPON	Ethernet Passive Optical Network
FTTB	Fiber-to-the-Building / Fiber-to-the-Basement
FTTC	Fiber-to-the-Curb
FTTCab	Fiber-to-the-Cabinet

FTTH	Fiber-to-the-Home
FTTN	Fiber-to-the-Node
FTTP	Fiber-to-the-Premise
FTTX	Fiber-to-the-X
GEPON	Gigabit Ethernet Passive Optical Network
GFP	Generic Framing Protocol
GHG	Green House Gas
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Network
HDTV	High Definition Television
HFC	Hybrid Fibre Coaxial
ICT	Information and Communications Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
ISDN	Intergrated Services Digital Network
ITU	International Telecommunications Union
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
IXC	Interchange Carrier
JFO	Junta de fusão ótica
JSO	Junta de splitting ótico
LEC	Local Exchange Carrier
LTE	Long Term Evolution
MAN	Metropolitam Area Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
M2M	Machine to Machine
NGN	Next Generation Networks
NG-PON2	Next Generation Passive Optical Network 2
OADM	Optical Add-drop Multiplexer
ODN	Optical Distribution Network

ODF	Optical distribution frame
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLT	Optical Line Terminator
ONT	Optical Network Terminator
ONU	Optical Network Unit
OPEX	Operational Expenditures
OTDR	Optical time-domain reflectometer
OXC	Optical Crossconnect
P2P/ PtP	Point to Point
P2M	Point to Multipoint
PDO	Ponto de distribuição ótico
PIM	Platform Interface Module
PON	Passive Optical Network
POTS	Plain Old Telephone System
PSM	Platform Switch Module
QoS	Quality of Service
RF Video/RFoG	Radio frequency over glass
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SONET	Synchronous Optical Networking
SRO	Sub-repartidor ótico
TWDM-PON	Time and Wavelength Division Multiplexing PON
UHDTV	Ultra High Definition Television
VDSL	Very high bit-rate Digital Subscriber Line
VoD	Video on Demand
VoIP	Voice over Internet Protocol
WAN	Wide Area Networks
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
XG-PON/10G-PON	10 Gigabit PON

Capítulo

1

Introdução

A imergência das telecomunicações digitais e, mais recentemente, o aparecimento de novas aplicações informáticas, tem sido o fator de impacto predominante para o recente desenvolvimento social e económico a nível mundial. A possibilidade de se estar conectado em qualquer lugar e a qualquer hora, abre uma janela para inúmeras oportunidades de serviço, que normalmente exigem o provisionamento de uma significativa largura de banda.

Em contraste com os serviços de telecomunicações primordiais, como a telefonia, a rádio e a televisão, as redes de computadores e a *internet* têm vindo a registar um crescimento notável num curto espaço de tempo. A navegação *web*, o correio eletrónico, as redes sociais, a partilha de ficheiros, a videoconferência, o VoIP (*Voice over Internet Protocol*), o IPTV (*Internet Protocol Television*), a HDTV (*High Definition Television*) e a UHDTV (*Ultra High Definition Television/4K*), a 3D *Television (3 Dimentional Television)*, o VoD (*Video on Demand*), a edição de vídeo caseira, jogos *online* multijogadores massivos, o *e-learning*, os serviços de telemedicina, a computação em nuvem, a *internet* das coisas, tornaram a *internet* omnipresente no dia-a-dia do estilo de vida atual.

Estas novas aplicações de elevada largura de banda são altamente dependentes da capacidade oferecida pelas infraestruturas de telecomunicações. Na verdade, com uma capacidade de crescimento de 100% a cada ano, o paradigma nas redes de telecomunicações mudou rapidamente de suporte ao tráfego local e de baixa largura de banda para fornecer conexões em todo o mundo com tráfego de alto consumo de largura de banda. Esta evolução foi verificada em todos os segmentos das redes de telecomunicações, desde da rede de acesso, passando pela rede metropolitana e nuclear. Os prestadores de serviços viram-se assim forçados a lidar com maiores volumes de tráfego e obrigados a atualizar os seus sistemas e tecnologias.

Atualmente, os prestadores de serviços, e genericamente a indústria de telecomunicações como um todo, estão a enfrentar um enorme desafio. Uma vez que os utilizadores esperam grandes larguras de banda, reduzidos tempos de carregamento e latência em serviços em tempo real, as redes de telecomunicações, além de proporcionarem uma alta capacidade de transmissão, têm que ser confiáveis, flexíveis, tolerantes a falhas. Todas estas características devem ser alcançadas com um cada vez mais baixo consumo de energia elétrica, ou seja, ao menor custo possível, por bit transportado.

Não obstante, um facto relevante dos problemas enfrentados atualmente pelas operadoras é que, embora os consumidores estejam a exigir maior largura de banda, os mesmos não estão dispostos a pagar mais por isso. Esta situação coloca uma enorme pressão sobre as operadoras, na forma de como elas devem rapidamente e eficientemente atualizar as suas redes com recursos financeiros cada vez mais limitados. Como ilustrado na Figura 1.1. e referido por diversas organizações, atualmente esta é era do domínio dos dados, em que as operadoras estão a enfrentar um fosso crescente entre as suas receitas e o aumento da exigência em largura de banda. Isto verifica-se porque as crescentes despesas necessárias para atualizar a capacidade da rede bem como o aumento do consumo de eletricidade não são suportadas tipicamente pelas receitas das operadoras, que não aumentam proporcionalmente.

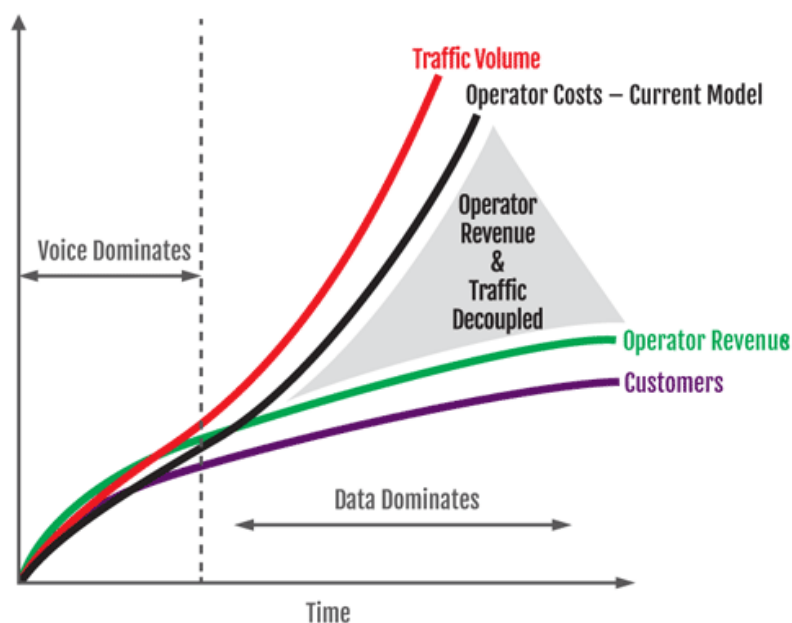


Figura 1.1. – Depleção entre volume de tráfego e as receitas do operador. (Fonte: Accenture, 2015)

Atualmente, a maioria das operadoras experienciam um processo muito lento de aumento de receita, sendo em muitos casos nulo, ou mesmo negativo. Portanto, o desafio atual exige novas tecnologias e arquiteturas de rede, mais eficientes, que possibilitem melhorar a capacidade e ao mesmo tempo reduzir o custo por bit transportado.

O tráfego IP (*Internet Protocol*) global anual vai ultrapassar o limiar do *Zettabyte* (1000 *Exabytes*) no final de 2016, e irá chegar aos 2 *Zettabytes* por ano em 2019 [1]. Em 2016, o tráfego IP global atingirá 1,1 *Zettabytes* por ano (quase um bilhão de *Gigabytes* por mês), e em 2019, o tráfego IP global atingirá 2 *Zettabytes* por ano. Na Figura 1.2. pode-se observar essa evolução crescente do tráfego, que se traduz num CAGR (*Compound Annual Growth Rate*) de 23% para o período de 2014 a 2019.

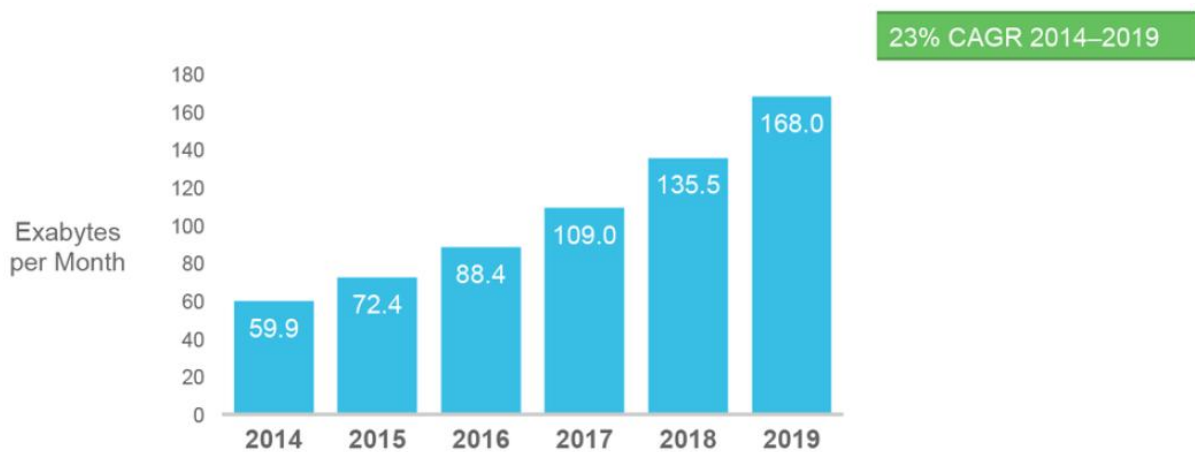


Figura 1.2. – Crescimento global do tráfego IP. (Fonte: Cisco - VNI 2015)

O número de dispositivos conectados às redes IP será mais do que três vezes a população mundial até 2019 [1], como podemos observar na Figura 1.3. Haverá mais de três dispositivos em rede por habitante em 2019, acima dos cerca de dois dispositivos em rede por habitante em 2014. Acelerada em parte pelo aumento em dispositivos e as capacidades desses dispositivos, o tráfego IP por habitante chegará a 22 GB em 2019, muito acima dos 8 GB de 2014.

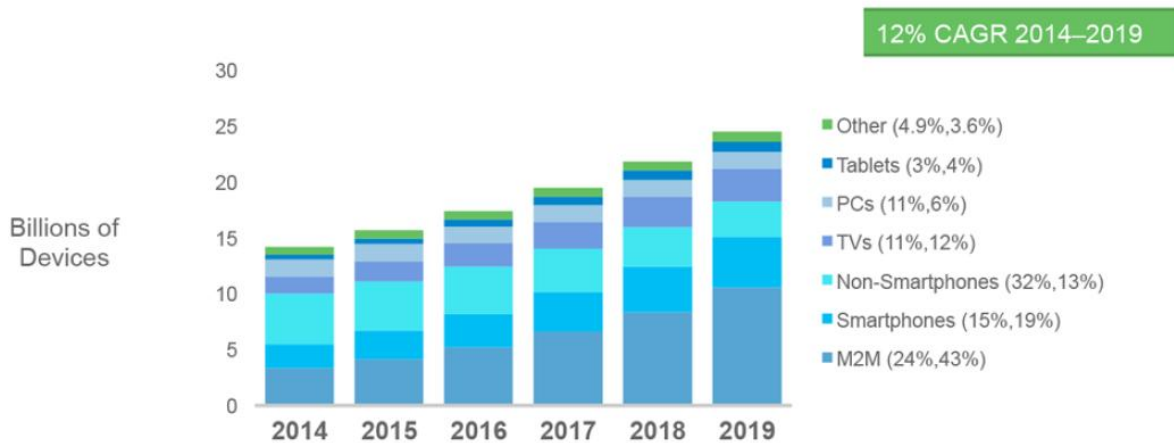


Figura 1.3. – Crescimento global do número de dispositivos ligados. (Fonte: Cisco - VNI 2015)

Conexões M2M (*Machine to machine*) serão a categoria com maior crescimento, com cerca de 26% do CAGR, crescendo mais de três vezes durante o período de previsão, para 10,5 bilhões de conexões em 2019 [1]. *Tablets* e *smartphones* vão ter o segundo crescimento mais rápido, cerca de 17% do CAGR (aumentando por um factor de 2.2). TVs conectadas (ao qual se incluem *smart TVs*, *set-top boxes*, adaptadores de media digital (DMAs), leitores de *Blu-ray* e consolas de jogos) irão quase duplicar, para 2,9 bilhões até 2019. Os PCs continuarão a estabilizar ao longo do período de previsão. Haverá quase tantos *tablets* como *laptops* até o final de 2019 (922 milhões de *tablets* e 919 milhões de *laptops*).

No final de 2014, 40% do tráfego IP e 22,5% do tráfego de Internet, do consumidor, era de origem em dispositivos não-PC. Em 2019, estes valores chegarão a 67% e 64% respetivamente, como se pode observar na Figura 1.4 [1].

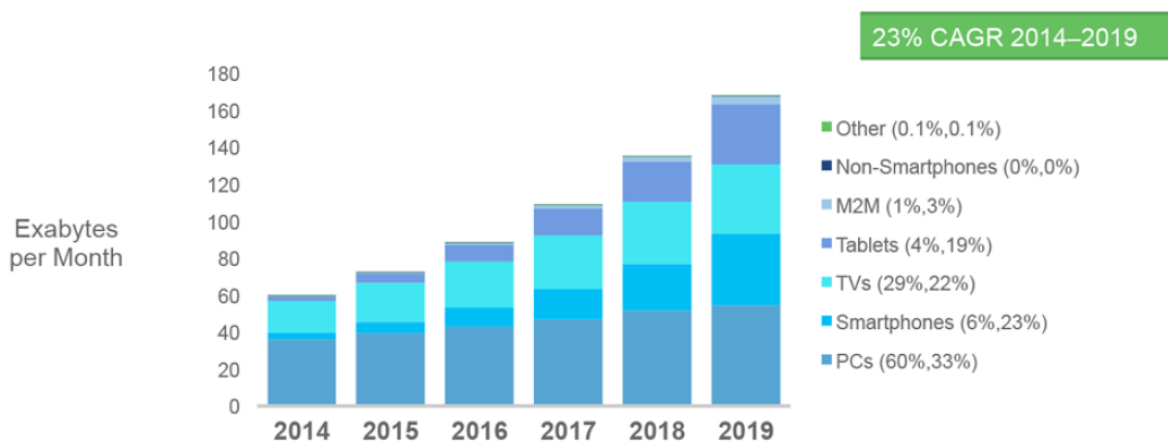


Figura 1.4. – Tráfego IP global, por tipo de dispositivo. (Fonte: Cisco - VNI 2015)

Como no caso das redes móveis, dispositivos de vídeo podem ter um efeito multiplicativo sobre o tráfego. Uma televisão HD (*High Definition*) com acesso à *Internet* que consome 45 minutos de conteúdos por dia a partir da *Internet* iria gerar tanto tráfego como uma família inteira hoje. Com o crescimento da visualização de vídeos em *tablets*, o tráfego proveniente de *tablets* está a crescer, como percentagem do total do tráfego *Internet*. *Tablets* serão responsáveis por 24 por cento do total do tráfego global de *Internet* em 2019, como se pode observar na Figura 1.5.

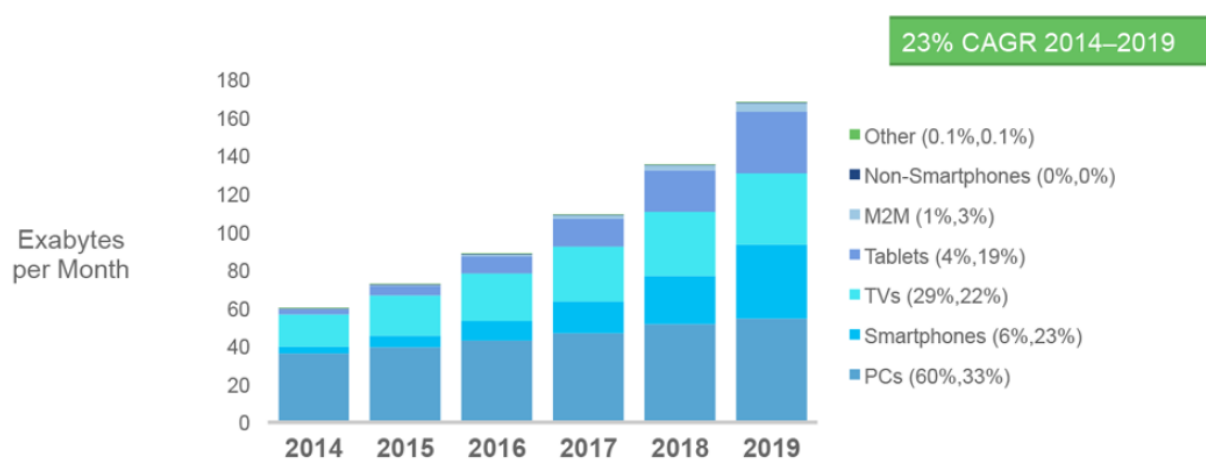


Figura 1.5. – Tráfego Internet global, por tipo de dispositivo. (Fonte: Cisco - VNI 2015)

O impacto do vídeo dos dispositivos no tráfego é mais pronunciado devido à introdução do *streaming* de vídeo de ultra-alta definição (UHD), ou 4K. Esta tecnologia tem um impacto tão grande porque o débito do vídeo 4K é cerca de 18 Mbps é mais do que o dobro do vídeo HD e nove vezes mais do que a definição padrão (SD). Estima-se que até 2019, 31 por cento das TVs serão UHD [1], como se pode observar na Figura 1.6.

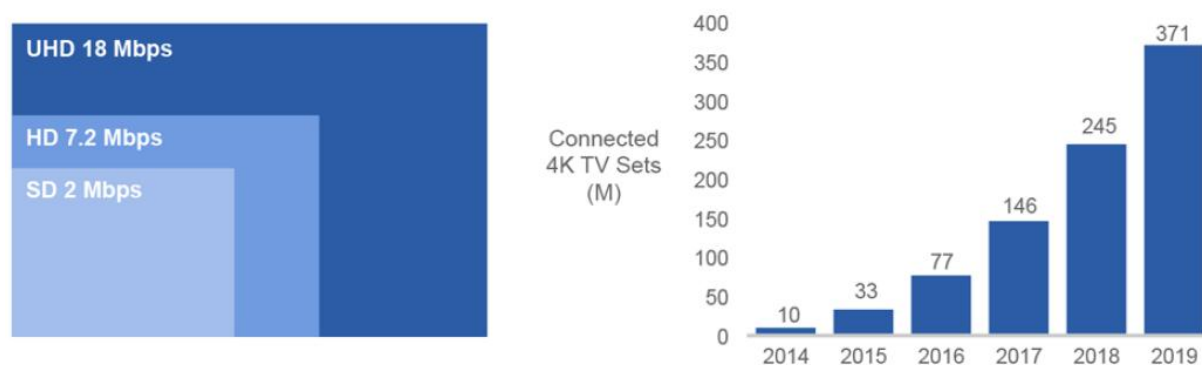


Figura 1.6. – Aumento da definição vídeo. (Fonte: Cisco - VNI 2015)

Como se pode ver na Figura 1.7. VoD IP ultra-HD (ou 4K) será responsável por 21% do tráfego global de VoD em 2019 [1].

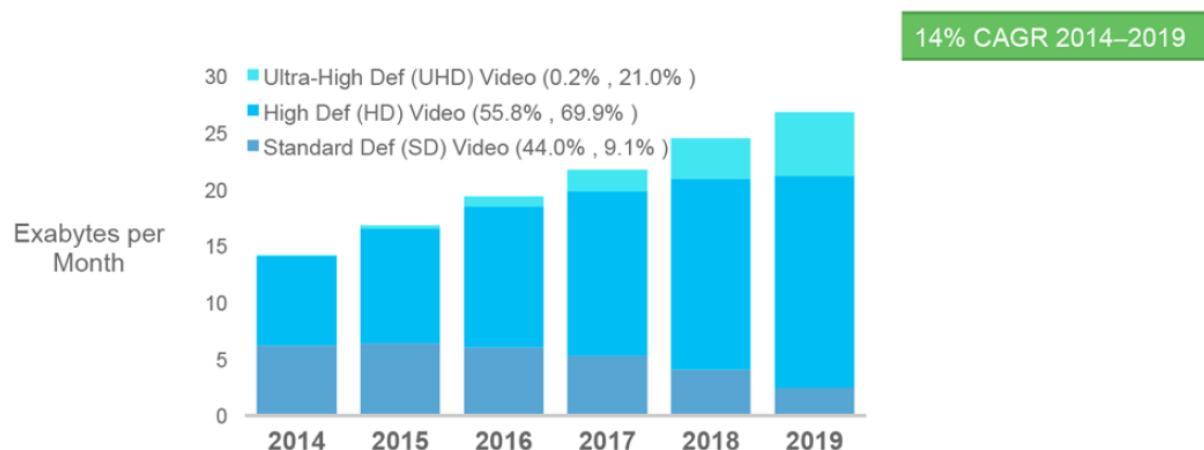


Figura 1.7. – Tráfego global vídeo 4K. (Fonte: Cisco - VNI 2015)

Os requisitos cada vez mais exigentes associados ao aumento da procura por banda larga foram correspondidos com diferentes tecnologias em cada segmento de rede. A rede de acesso fixa, tem sido o segmento de rede onde tem ocorrido uma evolução mais arrebatadora.

A procura de corresponder as exigências dos utilizadores por mais largura de banda, as redes de acesso fixas evoluíram dos antigos POTS (*Plain Old Telephone System*) para o ISDN (*Integrated Services Digital Network*), e em seguida para o ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), ADSL2+, VDSL (*Very high bit-rate Digital Subscriber Line*), VDSL2 e mais recentemente o *G.fast* (*Fast Access to Subscriber Terminals*), todas estas utilizando o par de fio de cobre como o meio de transmissão. Em paralelo com o desenvolvimento do

ADSL, foi desenvolvido o DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) para explorar a rede coaxial dos tradicionais operadores CATV (*Cable Television*), surgindo assim as populares redes HFC (*Hybrid Fibre-Coaxial*).

Com o avanço tecnológico, chegou a transmissão por fibra ótica. Sucessivas evoluções tecnológicas permitiram a chegada das PON (*Passive Optical Network*), redes óticas passivas, do tipo P2M (*Point-to-Multipoint*), apresentando equipamentos ativos apenas nas extremidades: o OLT (*Optical Line Terminator*) do lado da CO (*Central Office*) e o ONT (*Optical Network Terminator*) ou ONU (*Optical Network Unit*) na residência/escritório do cliente e equipamentos passivos entre a CO e o cliente, tais como *splitters*, fibras, *patch cords*, etc.. Este avanço, traduziu-se numa diminuição significativa nas necessidades energéticas, em comparação com as redes assentes em par de cobre, para além de outras vantagens como menor número de cabos na rede de distribuição, menor espaço para os equipamentos na CO, menor necessidade de refrigeração e maior facilidade na configuração e manutenção da rede.

Entretanto, surgiram também as AON (*Active Optical Network*), que primam por maior flexibilidade, largura de banda por utilizador e segurança em comparação com as PON. As AON podem apresentar equipamentos ativos nos nós de distribuição, principalmente *switches* L2 ou L3 entre a CO e o CPE (*Costumer Premises Equipment*) – na arquitetura *Active Star* - ou sem equipamentos ativos entre a CO e o CPE – na arquitetura *Home Run*. O PtP *Ethernet* (*Point-to-Point Ethernet*) é a tecnologia AON de arquitetura de *Home Run* mais popular na Europa (em redes do tipo FTTX - *Fiber-to-the-x*).

Numa análise cronológica, em 1995 a ITU-T (*International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*) desenvolveu a tecnologia APON/ATMPON (*Asynchronous Transfer Mode PON*), o G.983, que utiliza células ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). Em 1999 foi desenvolvida a BPON (*Broadband PON*), G.983.2-5, que introduziu diversas melhorias à APON, entre as quais se enaltece o conceito de DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*), visto que em termos de débitos (155Mbps Up/ 622Mbps Down) e rácio de *splitting* (1:32) não houve evolução entre APON e BPON.

Atividades de desenvolvimento significativas ocorreram durante o início do ano 2000 para desenvolver soluções de taxas de transmissão de *Gigabit* projetadas para oferecer serviços *Ethernet* e IP, e duas soluções muito diferentes foram normalizadas. Do lado do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), foi normalizado em 2002 o EPON

(*Ethernet Passive Optical Network*), IEEE 802.3ah, também denominado de GPON (*Gigabit Ethernet Passive Optical Network*). Pelo ITU-T em 2004 surgiu a GPON (*Gigabit-capable Passive Optical Network*) ITU-T G.984. Enquanto os conceitos gerais (modo de operação PON, estrutura ODN (*Optical Distribution Network*), planificação de comprimentos de onda) são os mesmos para ambas EPON e GPON, o funcionamento de ambas é muito diferente, bem como são os recursos e serviços suportados por cada uma. EPON é uma solução nativa *Ethernet*, que aproveita os recursos, a compatibilidade e desempenho do protocolo *Ethernet*, enquanto GPON aproveita as técnicas desenvolvidas para o SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*)/ SONET (*Synchronous Optical Networking*) e também o GFP (*Generic Framing Protocol*) para o transporte de *Ethernet*.

Apesar do significativo crescimento no mercado asiático – principalmente Japão, China e Coreia do Sul - por parte da tecnologia EPON, nos restantes mercados, foi a GPON a tecnologia dominadora, muito devido à sua estabilidade, menor OPEX (*Operational Expenditure*) associado à manutenção, refrigeração e aluguer de espaço e a sua capacidade para suportar mais assinantes por PON.

No entanto atividades de melhoria das tecnologias EPON e GPON continuaram em andamento nos últimos anos. Em 2009 a 10G-EPON (10 Gigabit EPON), 802.3av, foi o último padrão ratificado pelo IEEE e em 2012 foram ratificados pela ITU-T os padrões XG-PON1 e XG-PON2 (10 Gigabit PON), G.987, que se diferenciam na velocidade de *uplink* (2,5 e 10 Gbps respetivamente). Atualmente, apesar da introdução da 10G EPON e do XG-PON, continua a ser a GPON a tecnologia com o maior investimento a nível mundial como se pode observar na Figura 1.8.

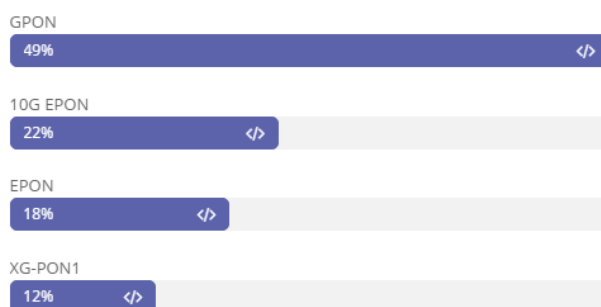


Figura 1.8. – Investimento mundial previsto em tecnologias PON em 2015. (Fonte: Ericsson - Energy and Carbon Report, 2014)

Este cenário de liderança absoluta da GPON tem uma justificação. A XG-PON foi desenvolvida a pensar na coexistência com a GPON, mas investimento em novos equipamentos que teriam que ser instalados, tanto na CO como no cliente, deveriam ser feitos. E o salto em termos de desempenho não atrativo. Além de que o surgimento da XG-PON ter sido acompanhado, pouco depois, pelo surgimento da tecnologia que viria a ser realmente responsável por um grande salto tecnológico, a NG-PON2 (*Next Generation Passive Optical Network 2*). As operadoras ao saberem que bastava aguardar 3 a 4 anos para adotarem a tecnologia NG-PON2, não hesitaram em manter a aposta na GPON, e fazer um *by-pass* a XG-PON até a chegada da NG-PON2.

Em 2015 é ratificado pelo ITU-T a aguardada NG-PON2 (*Next Generation PON2*) / TWDM-PON (*Time and Wavelength Division Multiplexing PON*), G.989, uma tecnologia revolucionária mas no entanto capaz de coexistir com a atual ODN, GPON, XG-PON, RF Video e OTDR (*Optical time-domain reflectometer*). Em Portugal, recentemente foi anunciada, a implementação da tecnologia NG-PON2 por parte da operadora Portugal Telecom, o que vai permitir significativos aumentos da capacidade e eficiência da rede.

Ainda na rede de acesso fixa, em 2001, o 802.16d, mais conhecido por WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) fixo, foi desenvolvido, com a especificidade de fornecer uma ligação *wireless* na rede de acesso fixa. Esta tecnologia não foi orientada para a mobilidade, portanto os dispositivos terminais nas instalações do cliente não estão limitados pela bateria nem pelo tamanho (ao contrário dos *smartphones* nas redes móveis), isso permite simetria de desempenho entre a estação base e o CPE. Normalmente, tanto o CPE e a estação base podem suportar elevada potência de saída através de antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). O resultado final é um rendimento aceitável em longas distâncias (1 Mbps a 40 Km).

A importância das redes de acesso de banda larga em lidar com as exigências crescentes de uma maneira energeticamente eficiente é crucial para evitar este segmento de rede se torne num prejuízo. Neste contexto, o foco do presente trabalho é a identificação de metodologias para ajudar a cumprir tal objetivo.

A seção seguinte discute as tendências de progresso previsto para o consumo energético e de banda larga nas redes de acesso fixas. Os objetivos e contribuições desta tese, no contexto de eficiência energética nas redes de acesso são resumidos no ponto 1.1 e, por fim, a organização deste trabalho na seção 1.2.

1.1. Enquadramento e motivação

A *Internet* é a fundação das telecomunicações globais e tornou-se parte integrante do crescimento económico sustentado do mundo. O grande crescimento da *Internet* tem sido possível graças a disponibilidade de tecnologias financeiramente acessíveis de transmissão ótica e de encaminhamento IP de alta capacidade. O aumento do uso de tecnologias óticas na rede de acesso proporciona um meio para o fornecimento de serviços de alta capacidade aos utilizadores finais. Com o aumento do tráfego *Internet*, devido a um crescente número de utilizadores e de serviços de maior largura de banda, a quantidade, capacidade e consumo de energia por parte dos equipamentos de transmissão e comutação necessários para o encaminhamento desse tráfego também está a crescer de forma alarmante.

O desafio é claro, como acomodar este crescimento e simultaneamente permitir uma economia de baixo consumo de carbono? Na realidade, mesmo com o crescimento contínuo previsto para as ICT (*Information and Communications Technology*), o impacto total das ICT deverá ser responsável por não mais de 2% das emissões totais globais de gases com efeito de estufa (GHG - *Greenhouse Gas*) em 2020. Isto deve-se em grande parte aos avanços na tecnologia e um esforço de toda a indústria para reduzir o consumo de energia. No entanto, em termos absolutos, os níveis de emissão das ICT são ainda consideráveis e devem ser tratados de forma agressiva. Um foco na priorização desempenho energético em toda a rede vai ajudar a identificar oportunidades para reduzir drasticamente o consumo de energia e as emissões de GHG.

Como se pode ver na Figura 1.9., estima-se que as emissões de carbono total para o sector das ICT seja de cerca de 1.100 milhões de toneladas em 2020 [2]. A participação do setor das ICT no total das emissões de carbono global é estimada que aumente de 1,3% em 2007 para cerca de 2% em 2020. Para as ICT de redes fixas, estima-se que a quota emissões de gases de efeito estufa seja de 1,4% em 2020.

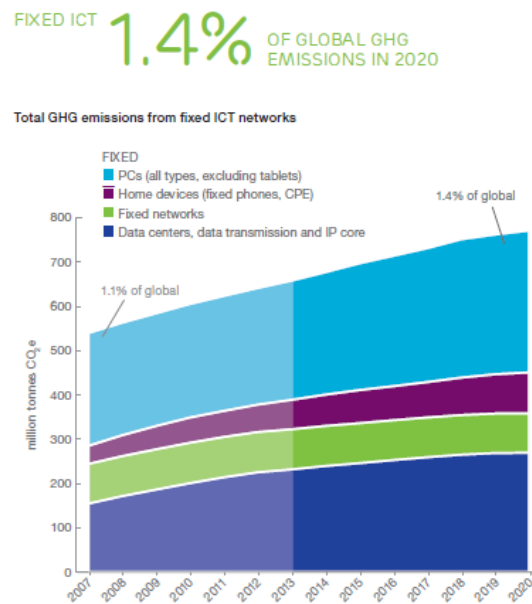


Figura 1.9. – Total de emissões de GHG em ICT fixas. (Fonte: Ericsson - Energy and Carbon Report, 2014)

O consumo de energia é uma questão económica, ambiental, social e política relevante. Além disso, os desafios de engenharia de gestão do consumo de energia nas redes de acesso estão a tornar-se uma questão de crescente preocupação. Isto levanta a questão de que se a *Internet* poderá em vez de ser limitada pela capacidade das tecnologias óticas e eletrónicas, sê-lo sim pelo seu consumo de energia.

Espera-se que o nível de emissões de gases de efeito de estufa tenha um crescimento menos acentuado um pouco para além do horizonte de 2020, uma tendência que terá que ser impulsionada por avanços tecnológicos e pelas mudanças no uso e operação das redes e dispositivos.

1.2. Objetivos e Contribuições

Atualmente, as redes fixas são responsáveis por 1,25% das emissões globais de CO₂ e estima-se que em 2020 este valor chegará aos 1,4% [2].

A maior parte da energia utilizada pela *Internet* hoje é consumida na rede de acesso [2], e este continuará a ser a situação no futuro. Tecnologias de acesso são assim, o foco

principal para a mitigação do uso de energia. Excetuando as redes domésticas, as redes de acesso, juntamente com redes de rádio móvel, são as principais contribuintes para o consumo de energia nas redes de comunicações. A Figura 1.10. apresenta os principais segmentos de rede onde o consumo energético é mais significativo para os operadores [3].

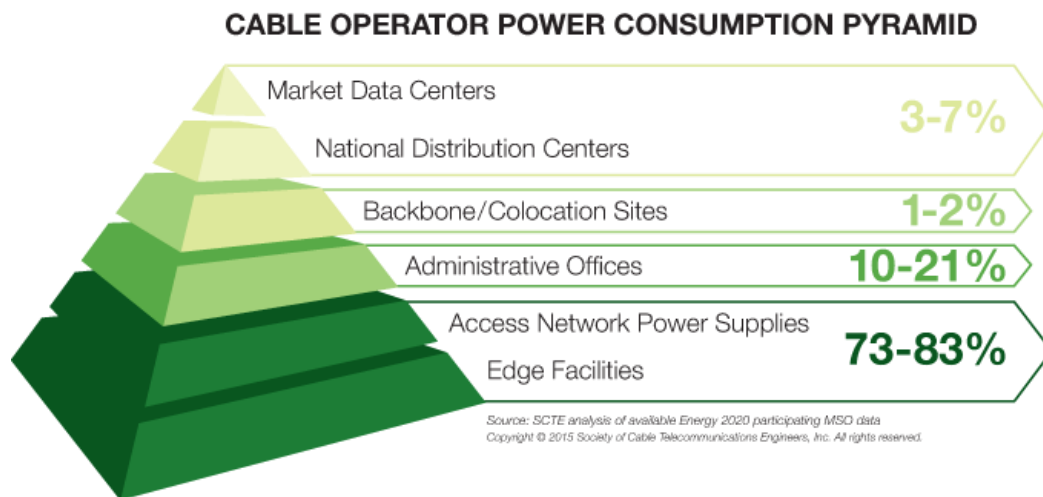


Figura 1.10 – Pirâmide de consumo energético dos operadores. (Fonte: Society of Cable Telecommunications Engineers, 2015)

A situação atual apresenta três grandes desafios: económico, ambiental e engenharia. Desafio económico pela importância das redes de acesso de enfrentarem o crescimento da largura de banda sem que o mesmo seja refletido no OPEX. Ambiental pela importância da redução das emissões de CO₂ caracterizadas pelo aumento desenfreado do consumo energético. E o desafio de engenharia na busca de fazer mais com menos, de encontrar uma solução eficiente de evolução. É crucial evitar que este segmento de rede se torne num cerne de prejuízo financeiro e ineficiência operacional.

Neste contexto, na presente dissertação apresenta-se uma análise detalhada do consumo de energia nas redes de acesso atuais. Este é um estudo que visa encontrar soluções e recomendações com o intuito de tornar as redes ICT sustentáveis, procurando a identificação de metodologias e técnicas para melhorar a eficiência energética nas ICT.

Serão descritos e abordados modelos de consumo energético e considerados diferentes cenários tecnológicos de redes de acesso para análise comparativa de eficiência energética entre as mesmas. Técnicas de poupança de energia também serão abordadas.

Resumindo, o objetivo principal desta dissertação aqui presente é contribuir para uma construtiva e aberta discussão sobre os benefícios de implementação de redes de acesso através de uma perspectiva de eficiência energética.

1.3. Organização

Este documento encontra-se dividido em 5 capítulos, focados no tema da eficiência energética nas redes de acesso.

No primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução sobre as redes de acesso, desde o cobre até aos sistemas atuais baseados em fibra ótica, com foco especial em implementações de acesso suportados por fibra ótica. Também são abordadas as tendências de progresso previstas para as redes de acesso ótico, juntamente com as propostas existentes para realizar estas redes do ponto de vista de eficiência energética. O enquadramento e a motivação deste trabalho encontram-se expostos na alínea 1.1., os objetivos e contribuições esperadas são resumidos no ponto 1.2.

O segundo capítulo apresenta os principais planos funcionais de uma rede de telecomunicações de nova geração. São abordadas as redes núcleo, metropolitana e de acesso em uma ótica de constituição e funções. É também feita a seleção das tecnologias óticas da rede de acesso que farão parte da análise de consumo energético em estudo. A nomenclatura FTTX é explicada neste capítulo bem como a sua relação com as tecnologias selecionadas para análise. Por fim, são apresentadas de forma mais detalhada as tecnologias óticas que serão alvo de comparações.

É no terceiro capítulo que se efetua um estudo sobre os modelos de cálculo do consumo energético de uma rede de acesso existentes atualmente. Estes modelos são apresentados e as suas componentes de cálculo são explicadas detalhadamente. Em conjunto com os modelos, são também tomadas algumas considerações gerais, nomeadamente, na arquitetura de uma rede com um determinado número de utilizadores para efeitos comparativos. É também neste capítulo que os valores específicos de consumo energético dos equipamentos, e os próprios equipamentos relevantes para o estudo são apresentados.

Os resultados obtidos e as devidas comparações entre modelos e tecnologias são apresentados no quarto capítulo tendo em vista a caracterização da rede de acesso.

Por fim, de acordo com os resultados obtidos, no quinto capítulo retiraram-se conclusões relativamente ao efeito da escolha tecnologia de acesso. Neste capítulo, é também abordado formas de mitigação do consumo energético de uma rede de acesso.

Capítulo

2

Redes de Telecomunicações de Nova Geração

O conceito atual de NGN (*Next Generation Networks*) baseia-se na construção inteligente de plataformas multiserviços suportadas em redes IP, que permitam a convergência, sendo que uma mesma rede deve transportar voz, vídeo e dados. As NGN são atualmente as infraestruturas de suporte de toda a banda larga. Foram definidas pela ITU como uma rede baseada em pacotes, capaz de fornecer serviços (incluindo serviços de telecomunicações), para fazer uso do QoS existente nas tecnologias de transporte em redes de banda larga e cujas funções relacionadas com o serviço são independentes das tecnologias subjacentes relacionadas com o transporte [4]. Oferecem acesso ilimitado aos utilizadores para diferentes prestadores de serviços, e suportam a mobilidade generalizada, que vem permitir a prestação consistente e omnipresente de serviços aos utilizadores.

Estas tecnologias encorajam uma estrutura de comunicação eletrónica renovada onde as oportunidades encontram-se no fornecimento de conectividade de banda larga ubíqua, novas aplicações, conteúdos atraentes e com o apoio geral para o desenvolvimento sustentável de todos os setores da economia. A sua implementação foi acompanhada de expectativa de riqueza de inovações, criação de emprego e crescimento económico.

A evolução das NGN foi sólida apesar de ter existido algumas incertezas económicas sobre o retorno dos investimentos. No ambiente competitivo de hoje, a viabilidade financeira é uma das principais preocupações da gestão e o sucesso de um projeto é medido pelo seu critério financeiro e as decisões são tomadas com base em previsões monetárias e impacto.

2.1. Planos Funcionais das Redes de Nova Geração

A arquitetura de uma NGN (ver a Figura 2.1) é normalmente dividida em planos funcionais que oferecem flexibilidade e escalabilidade à rede. Os planos funcionais são tipicamente separados por interfaces abertas que facilitam a interconexão e a integração de novos serviços, separando de forma eficaz as funções de serviço das de transporte.

As diferentes camadas são:

- Rede de Acesso (*"last-mile access"*): Este é o segmento de rede que se encontra mais próximo das instalações do utilizador, sendo utilizado para conectá-lo com a operadora de serviços. Compreende um conjunto de diferentes soluções de acesso de banda larga, tanto para residências como para escritórios, através de fibra, cobre, ou tecnologias sem fio. A escolha da tecnologia de acesso engloba entre outros critérios a questão dos custos (que por sua vez depende basicamente de variáveis demográficas e geográficas), possível reutilização das infraestruturas existentes e os requisitos do utilizador (e expectativas).
- Rede *Edge/Transporte/Regional/Metro*, também denominados por MAN (*Metropolitan Area Network*) ou LEC (*Local Exchange Carrier*): coletam e distribuem comunicações de e para as redes de acesso, interligando os nós onde o tráfego de dados é agregado, para ser transportado. Também fornecem a conectividade solicitada pelo domínio de serviço com a QoS necessária, dentro das políticas de restrições específicas.
- Rede *Core, Long-haul Core networks*, também denominado por WAN (*Wide Area Networks*) ou IXC (*Interchange Carrier*) *public networks*: interligam as redes de transporte.

As redes *Core* e *Metro* de hoje são quase na totalidade baseadas em sistemas de fibra ótica. Além disso, a penetração de comunicações de fibra ótica no segmento da rede de acesso está a progredir a um ritmo surpreendente, embora, muitas vezes, a competição entre prestadores de serviços, a busca por maiores lucros com base no quadro tecnológico estabelecido, e os *gridlocks* legislativos impeçam uma adoção ainda mais rápida desta tecnologia. Uma escala total de implantação de sistemas de fibra ótica nas redes de acesso

poderia reduzir ainda mais o consumo energético atual. Evidentemente, redes baseadas em fibras óticas são a tecnologia dominante, e literalmente, a espinha dorsal da futura *Internet*.

2.1.1. Rede Core

A rede *core* é parte essencial de uma rede de telecomunicações, é o coração da rede. Disponibiliza inúmeros serviços aos clientes, que estão interligados através da rede de acesso. É um meio de comunicação altamente funcional que interliga nós primários e disponibiliza rotas para a troca de informações entre as várias sub-redes.

Os equipamentos geralmente utilizados para as redes *core/backbone* são *routers* e *switchs*, de elevada capacidade, sendo o último usado com maior frequência. As tecnologias utilizadas na rede *core* são, principalmente, tecnologias da camada de rede e de enlace de dados, incluindo *links* de DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) e WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) que são interligados por OADM (*Optical Add-drop Multiplexer*) reconfiguráveis e OXC (*Optical Crossconnect*).

Redes *core* geralmente oferecem os seguintes recursos:

- Agregação: É o local de concentração de dados que convergem de múltiplas localizações do extremo da rede.
- Autenticação: Determinam se o utilizador tem permissões para utilizar determinado serviço da rede de telecomunicação.
- Controlo de chamadas/comutação: Processam a sinalização de chamada.
- Cobrança: Lidam com o processamento e compilação dos dados criados por vários nós de rede para efeitos de cobrança.
- Invocação de serviço: Executam a tarefa de invocação de serviço para os clientes. A invocação de serviço pode ocorrer em consonância com alguma atividade precisa (ex: encaminhamento de chamada) pelos utilizadores ou de forma incondicional (ex: chamada em espera).
- Gateways: Utilizado na rede *core* para aceder as outras redes. A funcionalidade de *gateway* depende do tipo de rede ao qual está ligado.

2.1.2. Rede Metro

A rede *metro* é o segmento de uma rede de telecomunicações que serve de interface entre as redes *core* e de acesso. Atualmente baseiam-se nas tecnologias DWDM, WDM e SDH/SONET, com esta última a perder, progressivamente, popularidade devido as suas limitações, visto que transporta o tráfego de dados em rajadas relativamente ineficientes, resultando assim num estrangulamento da largura de banda ao nível da rede metro. Este gargalo de largura de banda, que é amplamente referido como “*the metro gap*” impossibilita que os clientes com altos débitos e prestadores de serviços em redes de acesso local aproveitem as enormes quantidades de largura de banda disponíveis na rede *core*. A rede *metro* inclui *switches Ethernet* e *routers BNG (Broadband Network Gateway)* ou *BRAS/BBRAS (Broadband Remote Access Server)*. *Switches Ethernet* concentram o tráfego de um grande número de nós de acesso e fazem o *uplink* para dois (redundância) ou mais *routers BNG/BRAS*. Os *routers BNG/BRAS* fazem o controlo do débito de acesso, serviços de autenticação e segurança e ligam-se a vários *routers* que estão ligados ao *core* da rede.

As unidades terminais da rede de acesso são normalmente ligadas por canais Gigabit *Ethernet* a um *Edge Ethernet switch*. O número de DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*), OLTs (PON e FTTN - *Fiber-to-the-Node*) e pequenos *switches Ethernet (PtP)* que são suportados pelo *Edge Ethernet switch* depende dos detalhes das tecnologias de acesso, o débito binário e a taxa de subscrições.

2.1.3. Rede de Acesso

A rede de acesso é o segmento de rede compreendido entre uma CO (dependendo da tecnologia também chamado de Comutador Local - *Local Exchange* - ou Nó de Acesso - *Access Node*) e o equipamento do assinante (também chamado de Equipamento Terminal ou CPE). Recentemente também é chamada de primeira milha (“*first mile network*”) na medida em que se trata do primeiro segmento de rede visto pelos utilizadores de serviços de telecomunicações. A “última milha” é a parte mais cara da rede porque existem muito mais utilizadores finais do que nós de acesso. Exemplos de redes de acesso são: pares de cobre trançados, cabo coaxial e as fibras óticas. A fibra ótica tem sido amplamente utilizada em redes de acesso devido a sua enorme largura de banda e baixas perdas.

No entanto, até ao momento, as redes de acesso em fibra ainda não ultrapassaram o número de utilizadores "banda larga" de soluções DSL (*Digital Subscriber Line*). Existem atualmente, de acordo com a OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*), cerca de 345 milhões de assinantes de banda larga fixa, dos quais 51,6% (178 milhões) usam a tecnologia DSL, 31,3% (108 milhões) usam HFC e a fibra ótica representa 16,5% (57 milhões). Os restantes 0,6% utilizam outras tecnologias.

Na Figura 2.1. podemos observar um plano funcional de uma rede telecomunicações com os respetivos segmentos de rede anteriormente mencionados [5].

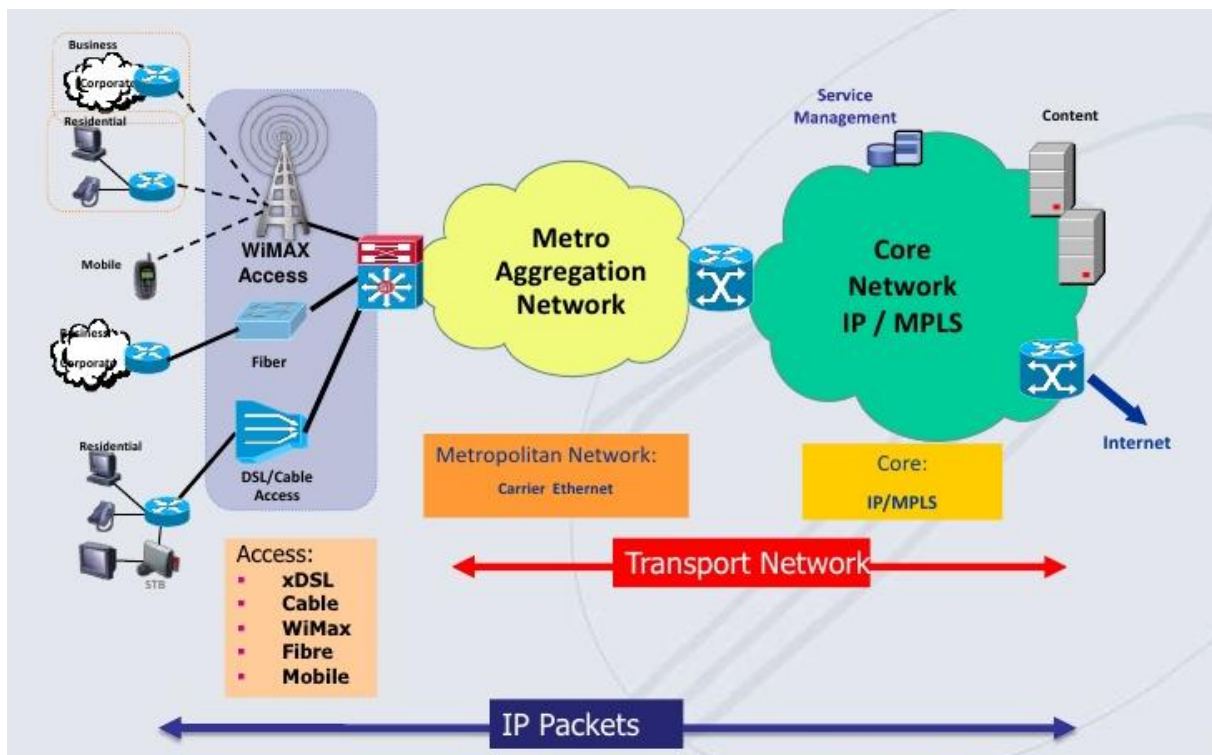


Figura 2.1. – Planos funcionais de uma rede de telecomunicações. (Fonte: Logtel, 2011)

Como já foi dito, a secção que liga os assinantes ao seu provedor de serviço é denominada de rede de acesso. Uma rede de acesso de nova geração é formada parcialmente ou na totalidade por elementos óticos, sendo capaz de fornecer serviços de acesso à banda larga com características melhoradas em comparação com os fornecidos pelas redes de cobre existentes.

No que diz respeito à velocidade de acesso fornecidos por uma rede de acesso, deve ser salientado que não há uma definição estrita do limiar mínimo neste ou em qualquer outro

parâmetro de qualidade. Um acordo tácito ao nível da indústria nacional parece colocar esse número em 100 Mbps, mas para provar a indefinição do caso, nem sempre há indicações claras se esta velocidade é sempre garantida, mas sim que é um valor de pico, potencialmente alcançável em alguns períodos e o canal é compartilhado entre um grupo de clientes e claro refere-se apenas ao canal a jusante (*downlink*).

Em qualquer caso, há uma série de decisões regulamentares e dos planos estratégicos digitais que abordam implicitamente figuras de 30 a 100 Mbps a este respeito. A Agenda Digital estabeleceu que a meta para 2020 são velocidades de Internet de 30 Mbps (garantidos) ou acima para todos os cidadãos europeus, estando metade dos agregados familiares europeus ligados a conexões de 100 Mbps ou superior [6].

2.2. Tecnologias em Análise

Geralmente, salvo algumas exceções, as tecnologias de acesso em banda larga são classificadas pelo meio físico em dois grandes grupos: tecnologias com fio – rede fixa – e tecnologias sem fio – rede móvel. As principais tecnologias com fios são baseadas em fibra ótica, cabo coaxial, fio de cobre e cabo de eletricidade (*power line*) (esta última opção é comumente deixada de lado devido à sua baixa implantação e fracas perspectivas para o mercado de massa).

Tecnologias tais como o 3G (*Third Generation of Mobile Telecommunications*), o LTE (*Long Term Evolution*), o WiMAX ou as redes de satélite também fornecem serviços de banda larga, mas estas tecnologias possuem arquiteturas, características e limitações fundamentalmente diferentes, das redes de acesso fixas. Desse modo, esta discussão ficará confinada as principais tecnologias atualmente utilizadas nas redes de acesso fixas, e as suas versões mais recentes.

Cada tecnologia considerada para o estudo tem as suas vantagens e desvantagens em termos de largura de banda máxima/velocidade de transmissão, confiabilidade, custo de implantação e facilidade de cobertura.

Na Tabela 2.1. estão algumas das principais características das tecnologias consideradas para o estudo.

<i>Grupo</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>				<i>Full Service Access Network</i>		
<i>Arquitetura</i>	AON				PON		
<i>Tecnologia</i>	P2P Ethernet	Active Ethernet	EPON	10G-EPON	GPON	XG-PON	NG-PON2
<i>Standard</i>	IEEE 802.3bx	IEEE 802.3bx	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av	ITU-T G.984	ITU-T G.987	ITU-T G.989
<i>1.º Standard</i>	2002	2002	2004	2008	2008	2010	2015

Tabela 2.1. – Sumarização das soluções técnicas a comparar.

As tecnologias fixas fornecem altas velocidades de acesso (especialmente as óticas), são também independentes de recursos escassos como o espectro, são mais confiáveis em termos de cobertura quando utilizadas em zonas de alta densidade, fornecem maior segurança e para além destes fatores, existe a possibilidade de alocar recursos de banda larga dedicados aos assinantes. De qualquer forma as tecnologias fixas têm também algumas desvantagens como as altas exigências de despesas na fase de implementação devido a obras de construção da rede (que correspondem a mais de 50% dos custos), e do fato de que, em zonas isoladas ou de difícil acesso as implementações exigem investimentos ainda mais elevados por assinante.

Na realidade, apenas soluções de rede FTTH e FTTB (*Fiber to the Building*) (ou FTTP – *Fiber to the Premise*), apresentam larguras de banda verdadeiramente à prova de futuro visto serem compostas totalmente por fibra ótica, desde o CO até ao equipamento do assinante, evitando assim o efeito de estrangulamento que existe em soluções híbridas. Em Portugal, o FTTH e o FTTB apresentam uma taxa de adoção sem paralelo, sendo o FTTH a arquitetura mais utilizada para a expansão das redes na maioria das áreas. Apesar do FTTH ser uma escolha melhor para habitações isoladas ou em pequenos grupos de casas, é nos apartamentos e edifícios de escritórios onde tem tido maior expressão. Nesses casos a fibra ótica é terminada numa sala técnica do edifício, num RGFO (Repartidor geral de fibra ótica) e, de seguida, são utilizados cabos de fibra ótica ao longo do edifício (*riser*) para chegar as caixas distribuídas no edifício (*floorbox*), normalmente uma por piso. Por fim, a partir da *floorbox* é passado um cabo (*drop*) de fibra até ao apartamento/escritório do assinante.

Dada esta e outras considerações, diversas soluções de acesso são atualmente utilizadas pelos operadores nacionais e internacionais, tendo algumas maior expressão em determinadas regiões do globo. As soluções para a rede de acesso fixa escolhidas para análise

nesta dissertação são as soluções FTTH AON: P2P Ethernet (*“Home Run Ethernet”*) e Active Ethernet (*“Active Star Ethernet”*), e as soluções FTTH PON: GPON, EPON, 10G-EPON, XG-PON e NG-PON2 (TWDM-PON).

Perante estas tecnologias, não existe uma escolha óbvia para todas as situações no que diz respeito a um cenário demográfico específico, e na prática, um operador de telecomunicações eficiente é aquele que provavelmente usa uma combinação de tecnologias. Considerando esse pressuposto implícito, analisar minuciosamente as particularidades de cada uma destas tecnologias possibilitará chegar a conclusões interessantes.

2.3. Tecnologias não Elegíveis para a Análise

A largura de banda, a interferência, o alcance, o débito por utilizador são fatores limitativos que provocam restrições ao uso de ligações por par de cobre, cabo coaxial bem como nas tecnologias de acesso sem fios. Estas limitações são limitações físicas inerentes aos meios de transmissão utilizados nestes casos. Para satisfazer as exigências existentes atualmente e as vindouras, apenas os serviços assentes em redes de acesso de fibra ótica estão a altura.

Atualmente, o custo e de implantação de redes óticas, que é o fator decisivo para aprovação dos projetos de implementação está em decréscimo e o FTTH encontra-se isolado na liderança das preferências das operadoras, as soluções em cobre ou coaxial já não estão a altura das exigências enquanto as móveis ainda têm um percurso a percorrer para serem verdadeiras concorrentes. Só a fibra ótica pode fornecer a capacidade e o desempenho que será exigido por futuros serviços de banda larga e por esse motivo as FTTH (e também as FTTB) têm sido apelidadas como tecnologias à prova de futuro para as redes de acesso. Um número significativo de arquiteturas de rede de acesso ótico foram padronizados e tanto os componentes como os dispositivos tornaram-se mais rentáveis e mais amadurecidos. Assiste-se atualmente a uma implementação mundial de redes de acesso por fibra ótica e um aumento constante de utilizadores.

Pelos motivos descritos anteriormente e limitações inerentes a transmissão por cobre e coaxial, esta dissertação não abordará, entre outras tecnologias, as tecnologias em decréscimo de utilizadores como o ADSL2+, o VDSL/VDSL2, o HFC DOCSIS 3.0/3.1 nem a tecnologia

em cobre mais recente, o G.fast. Não foram consideradas as tecnologias de acesso sem fios WiMAX e também as tecnologias móveis atuais (3G, LTE) devido ao elevado consumo elétrico e menor largura de banda por utilizador, em comparação com as tecnologias óticas.

2.4. Taxonomia das Arquiteturas FTTX

A taxonomia das arquiteturas FTTX varia de acordo com a proximidade da seção de fibra - que parte do CO - às instalações do cliente, ou seja, FTTX é apenas um termo genérico para definir qualquer arquitetura de rede de banda larga que utilize a fibra ótica para fornecer a totalidade ou parte do lacete local, usado para as comunicações na rede de acesso.

5

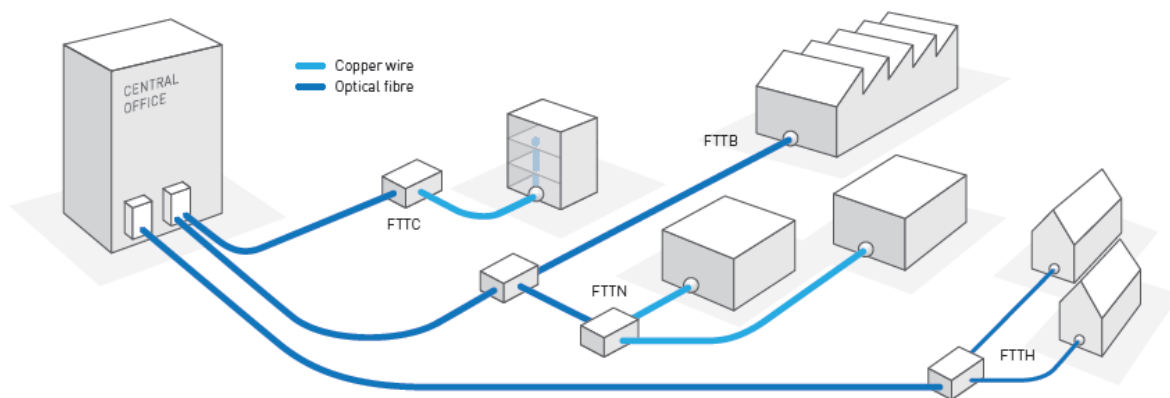


Figura 2.2. – Arquiteturas FTTX. (Fonte: COMSOF, 2013)

A taxonomia das arquiteturas FTTX é, por si só, confusa o suficiente para exigir alguns esclarecimentos. Os diferentes tipos de FTTX dependem do local onde se faz a transição do sinal do domínio ótico para o elétrico, como se pode observar na Figura 2.2. Podemos dividir as FTTX em dois grupos distintos:

- Soluções baseadas totalmente em fibra ótica – FTTH, FTTB/FTTP onde a fibra é o único meio de transporte desde a CO até à rede do cliente.
- Soluções híbridas compostas por fibra ótica e par de cobre ou cabo coaxial – FTTC (*Fiber to the Curb*), FTTCab (*Fiber to the Cabinet*), FTTN, onde serão usados em parte da rede, ainda o cabo coaxial (rede HFC), ou mesmo o cobre entrançado existente.

2.4.1 FTTN/FTTCab – Fiber to the Node ou Fiber to the Cabinet

Esta arquitetura é vista como uma etapa intermédia antes da transição para o FTTH na medida em que é constituída por cabos óticos desde a CO até aos armários de distribuição que servem áreas relativamente reduzidas, com cerca de 1500m de raio. Destinam-se a uma distribuição para uma densidade populacional de algumas centenas de utilizadores. A ligação do utilizador ao armário é suportada por cabo coaxial ou o tradicional par de cobre.

As taxas de transmissão são variáveis, dependendo do protocolo usado e da distância a que o cliente se encontra do respetivo armário. Esta é uma arquitetura muito usada nas redes de distribuição das operadoras de serviços de telecomunicações de TV cabo.

2.4.2 FTTC – Fiber to the Curb

Esta arquitetura descreve a implementação de fibra ótica desde o CO até um armário que agrega uma pequena área de cerca de 300m de raio, associado a uma pequena densidade populacional, que se interliga a esse armário através de cabo coaxial ou par entrançado de cobre.

Esta arquitetura difere da designada por FTTN/FTTCab principalmente no comprimento do cabo de cobre/coaxial, pois o mesmo não tem mais do que 300 metros de comprimento, enquanto em FTTN/FTTCab o comprimento da parte de cobre do lacete local é superior a 300 metros, ou seja, num cenário em FTTC, a fibra é distribuída por armários de rua perto da residência do assinante. Em oposição, em FTTCab, a fibra liga-se a armários que se situam a maior distância das residências dos clientes.

Em FTTC, FTTN, FTTCab, os custos de implementação são por norma reduzidos visto que se reaproveita a rede coaxial ou de cobre já existente para se chegar as instalações do assinante. O principal aspeto negativo é perda de largura de banda, que se deve ao facto de estas soluções usarem as infraestruturas e cabos existentes, quer eles sejam coaxiais ou pares de cobre.

2.4.3 FTTB/FTTP – Fiber to the Building ou Fiber to the Premise

Esta arquitetura diz respeito à implementação de fibra ótica desde o CO e até à entrada de um edifício, quer seja residencial ou empresarial, normalmente até um bastidor numa sala de telecomunicações na cave onde se dá uma conversão do sinal ótico em elétrico. Seguidamente, a ligação entre a sala de telecomunicações e o CPE é assegurada por um conjunto de *Routers*, *Switches* e cabos UTP (*Unshielded Twisted Pair*).

2.4.4 FTTH – Fiber to the Home

Este cenário contempla a implementação de fibra ótica em toda a rede de acesso, ou seja, desde a central de distribuição, até ao equipamento final, colocado na residência do cliente. Esta arquitetura é pois uma outra solução, em que não se faz uso da rede existente de cobre ou coaxial em parte alguma do “percurso”, servindo o assinante apenas por meio de fibra ótica, do tipo SMF (*Single-Mode Optical Fiber*). Nos cenários FTTH os equipamentos do utilizador, quer eles sejam sistemas de voz, dados ou de vídeo/imagem, estão todos ligados a um ONT, que se interliga com a rede exterior por meio de fibra. É neste dispositivo que o sinal ótico é convertido em sinal elétrico e distribuído por diversos equipamentos. Equipamentos esses que podem ser, grande maioria dos casos, um *Router* ou *Switch*, e por fim estes convertem o sinal para os protocolos apropriados e entregam-no num equipamento final que pode ser, por exemplo, uma *set-top-boxes* ou um AP (*Access Point*).

Resumindo, a arquitetura de rede ótica FTTH rege-se pelo facto de utilizar apenas fibra ótica na ligação entre a CO e as instalações do cliente e por esse facto é uma arquitetura a prova de futuro. A Figura 2.3. mostra um modelo típico de uma rede de acesso FTTH, com algumas das variantes tecnológicas que podem ser aplicadas.

2.6 Redes AON e Redes PON

Também em termos funcionais, podemos ver diferenças nas soluções FTTH. Uma das mais relevantes é o facto de a rede poder ser ativa ou passiva, AON ou PON.

Uma rede AON é muito semelhante a uma PON, no entanto, existem quatro principais diferenças. Em primeiro lugar, em vez de ter divisores passivos, não controláveis, na rede, são tipicamente utilizados *Switch L2/L3* para a agregação dos acessos de fibra - AN (*Access Node*). Em segundo lugar, em vez de haver partilha da largura de banda entre os vários assinantes, cada utilizador final possui um canal dedicado que fornece largura de banda total disponível, de forma bidirecional. Cada sinal que parte do AN é encaminhado apenas para o cliente para ao qual se destina, não havendo partilhas de sinal, logo é mais seguro. A terceira diferença entre arquitetura PON e o AON é a limitação de distância. Numa rede PON típica, o assinante mais distante não deve estar a mais de 20km da CO, dependendo do número total de divisões na rede (mais divisões = menor distância). Uma rede AON, por outro lado, tem um raio limite de 80 km, independentemente do número de assinantes servidos. O número de assinantes é limitado apenas pela capacidade dos *Switchs* implementados, e não pela infraestrutura em si, como no caso das PON. A fibra ótica no assinante pode ser terminada com um ONT, mas também com um *Switch* ou *Router*.

Na rede AON, existem duas topologias: *Active Ethernet* e *P2P Ethernet* (ou “*Home Run Ethernet*”), que como o nome indica, apoiam-se em *Ethernet*. A principal diferença entre estas duas topologias reside na localização do AN – já o tipo de AN pode variar na sua conceção dependendo das especificações, sendo comuns os *Metro-Ethernet Switches* (MS), *IP Edge-Routers* (ER) ou *Multi-Service Access Nodes* (MSANs) [8].

Na topologia *Active Ethernet* num determinado ponto da ODN, existe um AN, alimentado eletricamente, responsável pela distribuição do sinal. No caso da topologia *P2P Ethernet* existe uma fibra que sai desde a CO diretamente até as instalações do assinante sem elementos passivos ou ativos pelo meio. Neste caso, o AN encontra-se no interior da CO, o que pode significar que nesta situação, a partida, menos energia é necessária para enviar o sinal através da ODN [9].

Em algumas publicações a tecnologia *Active Ethernet* é considerada como sendo P2MP, na medida em que existe partilha do meio físico, mas apesar da quantidade física de

fibras a saída da CO ser inferior que a chegada as instalações dos assinantes, cada assinante possui uma fibra dedicada a partir do AN. Na Figura 2.5 temos a representação típica de uma rede AON [9].

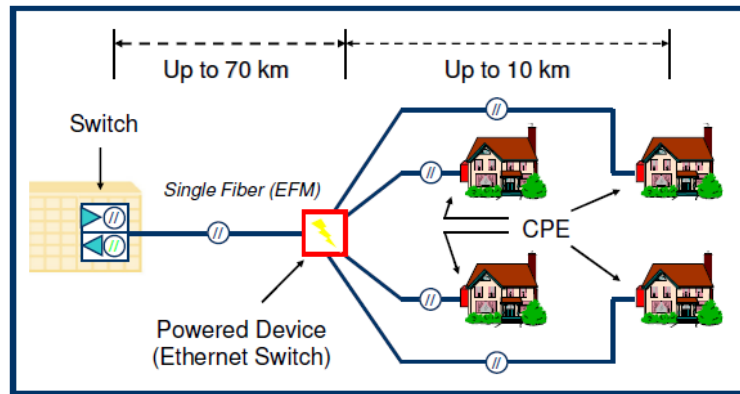


Figura 2.5. – Arquitetura AON. (Fonte: RF Wireless World, 2015)

Após a rede metro, o OLT é o primeiro elemento de uma rede de acesso PON e fornece n interfaces *uplink* de Ethernet de 1 Gbps ou 10 Gbps e interfaces PON no sentido dos assinantes. Uma PON é uma rede P2MP, logo existe partilha de canal entre utilizadores, o que reduz a sua segurança. Consiste num OLT localizado no CO e um conjunto associado de ONTs localizados nas instalações dos clientes. Uma PON caracteriza-se por não utilizar equipamentos eletrónicos na ODN, em vez disso usa divisores passivos denominados de *splitters* para dividir a largura de banda entre os utilizadores finais. Na Figura 2.6 temos a representação típica de uma rede PON. Podem existir um ou mais níveis de divisão na ODN, sendo típicas divisões tais que possibilitam o serviço a 32 ou a 64 utilizadores ao longo de uma distância máxima de 20 km. [9]

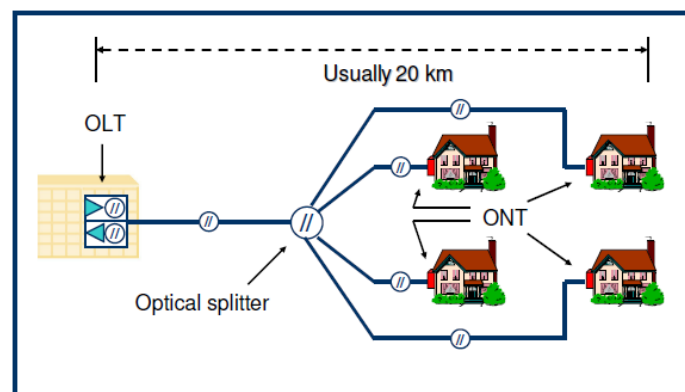


Figura 2.6. – Arquitetura PON. (Fonte: RF Wireless World, 2015)

Existem atualmente diversos tipos de tecnologias óticas passivas, entre elas destacam-se: EPON, 10G-EPON, GPON, 10G-PON (XG-PON) e NG-PON2 (TWDM-PON). Entre estas, a que apresenta menor popularidade é a tecnologia XG-PON (10G-GPON). Não foi adotada de forma significativa pelas operadoras pois o investimento a fazer não era de todo apropriado relativamente ao salto tecnológico oferecido e além desse facto, era do conhecimento que o NG-PON2 estaria brevemente disponível. O mais recente padrão ratificado, o NG-PON2, tem sido adotado com naturalidade, como o verdadeiro sucessor do GPON. A Tabela 2.2. evidencia as principais diferenças entre as tecnologias AON e PON [7] [8].

<i>Critério Comparação</i>	<i>AON</i>	<i>PON</i>
Largura de Banda	Elevada largura de banda, cada utilizador tem a sua fibra.	Satisfatório, mas pode ser melhorado com a introdução do NG-PON2.
Débito máximo por utilizador	Débito elevado.	Satisfatório, o sinal é partilhado.
Aumento de largura de Banda	Simples e barato.	Complexo, caro e pode ser necessário reorganizar ODN.
Consumo de fibra	Elevado, cada utilizador tem a sua fibra.	Médio, a fibra que chega ao splitter é partilhada.
Risco de espionagem	Baixo. O canal é dedicado.	Elevado, os dados do utilizador passam por outras ONT (antes de serem descartados)
Resolução de avarias	Simples. Fácil identificar equipamento em falta e substituí-lo. Impacto reduzido.	Médio. Mais desafiante descobrir o local exato da avaria.
CAPEX	Elevado, tanto para assinantes como para os operadores (preço equipamentos).	Médio para utilizadores e baixo para as operadoras.
OPEX	Elevado, AN no exterior necessitam de alimentação elétrica. Mais portos por cliente significa mais pontos de avaria.	Baixo, a ODN passiva é bastante estável e não consome energia.

Tabela 2.2. – Comparação AON vs. PON.

2.7. Tecnologias na Rede de Acesso Ótica

As arquiteturas de rede apresentadas na secção anterior em conjunto com as tecnologias que serão seguidamente apresentadas serão utilizadas para efeitos de cálculos de

energia, permitindo assim uma comparação direta dos custos de consumo de energia por bit transmitido. Segue uma breve introdução de cada uma das tecnologias.

2.7.1. Tecnologias PON do Grupo FSAN/ITU-T

Atualmente, existem várias tecnologias PON. Resumidamente, o grupo FSAN, iniciou os seus trabalhos com redes baseadas em ATM, designadas por APON, que deram lugar às BPON - utilizadas para serviços de banda larga dos operadores de televisão por cabo transportando apenas células. De seguida surgiu o GPON que transporta tanto células como pacotes. Anos depois foi ratificado o XG-PON (ou 10G-PON) e a mais recente tecnologia do grupo é o NG-PON2.

2.7.1.1. APON e BPON | ITU-T G.983

O APON foi o primeiro padrão de rede ótica passiva. Foi principalmente utilizado para aplicações de negócios e baseava-se em ATM.

O BPON é um padrão que evoluiu do APON e apresenta um débito de 622 Mbps e 155 Mbps, ascendente e descendente respetivamente.

2.7.1.2. GPON | ITU-T G.984 Series

GPON é uma tecnologia de acesso de largura de banda elevada, partilhada, padronizada pelo ITU-T, nas séries do G.984. (1,2,3,4,5,6) e que é utilizada em todo o mundo para fornecer serviços de *3-play* (triple play) de televisão, internet e de voz. É uma evolução do padrão BPON, suportando débitos mais elevados, maior segurança e escolha do modo de encapsulamento de dados, embora quase todos os sistemas utilizem GEM (*GPON Encapsulation Method*). Podem ser transportados tráfego Ethernet, ATM e TDM (PSTN, ISDN, E1 e E3). A Figura 2.7. apresenta uma organização típica de uma rede GPON, incluído o vídeo RF. [10]

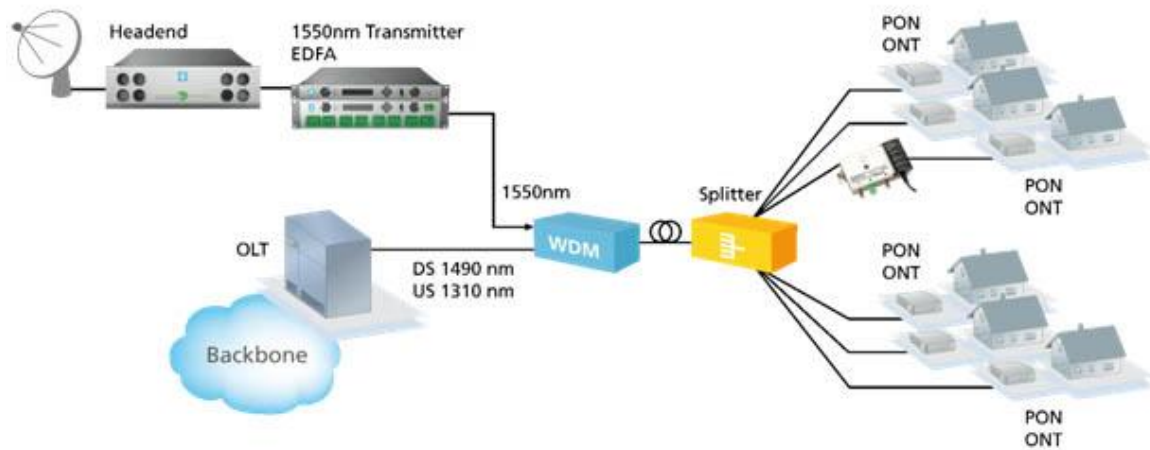


Figura 2.7. – Modelo de rede de acesso GPON. (Fonte: RF Wireless World, 2015)

Numa rede de acesso GPON, existem três componentes principais: O OLT que é o concentrador da rede, instalado na CO, o *Splitter* ótico, que permite que uma única fibra seja compartilhada por vários utilizadores, e o ONT que apenas poderá ser utilizado por 1 cliente final, convertendo os sinais óticos em sinais elétricos, que podem ser interpretados pelo *router*. Os comprimentos de onda utilizados são 1490 nm em *downstream* e 1310 nm em *upstream*. O *RF Overlay*, o transporte do sinal de vídeo analógico que é acoplado à fibra através de um DWDM, é transportado no comprimento de onda de 1550 nm. O padrão G.984.6 permite um alcance máximo de 60 km (utilizando um *Mid-Span Extender*) [11]. No entanto, os sistemas GPON mais implementados, tipicamente permitem distâncias máximas de 20km nas classes B+. Os transmissores e recetores GPON são, na maioria dos casos, de classe ótica B+, ou seja, estão concebidos para um orçamento ótico para a toda a ODN de 28,5 dB. Na Tabela 2.3. podemos ver os valores típicos de perdas mínimas e máximas permitidas para redes PON de classe B+/N1, N2, C+/E1 e E2.

	Classe B+ (GPON) Classe N1 (XG-PON; NG-PON2)	Classe N2 (XG-PON; NG-PON2)	Classe C+ (GPON) Classe E1 (XG-PON; NG-PON2)	Classe E2 (XG-PON; NG-PON2)
Perdas Mínimas (dB)	14	16	18	20
Perdas Máximas (dB)	28,5	31	33	35

Tabela 2.3. – Perdas mínimas e máximas permitidas para redes PON.

É sabido que uma SMF do tipo G.652 apresenta uma atenuação média de 0,36 dB @1310nm (e 0,25 dB @1490nm), portanto numa ODN de 20 km, isso equivale a perdas na ordem dos 7,2 dB, apenas na fibra. A estas perdas ainda se devem juntar as fusões da fibra, tipicamente 0,01 dB e os conectores, tipicamente 0,2 dB.

A transmissão pode ser simétrica, mas a grande parte dos sistemas GPON utiliza os 2,5 Gbps no *downstream* e 1,25 Gbps no sentido *upstream*. A largura de banda em ambos os sentidos é partilhada de maneiras diferentes. No *downstream*, é utilizado o TDM, sendo a difusão dos dados feita de igual forma (*broadcast*) por todas as ONTs, e cada ONT retira a informação com o endereço que lhe corresponde. Já no *upstream*, é utilizado o TDMA, ou seja, cada ONT transmite a informação durante um intervalo de tempo que é-lhe atribuído pela OLT. Este processo encontra-se ilustrado na Figura 2.8. [12]

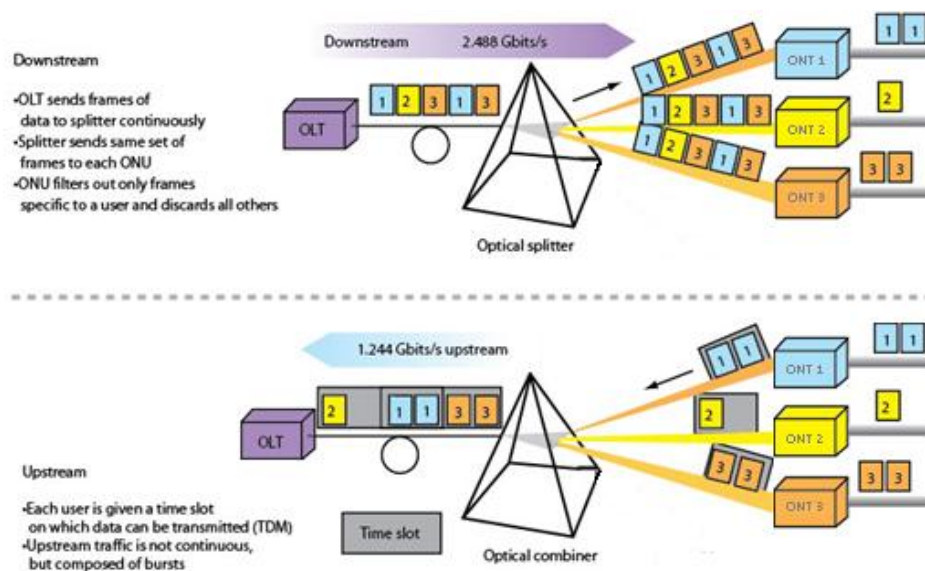


Figura 2.8. – Tráfego TDM downstream (*broadcast*) e TDMA upstream em GPON.

(Fonte: Electronicdesign, 2007)

Um ONT poderá utilizar mais que um intervalo de tempo, e cada um destes intervalos poderá ter comprimentos diferentes, graças a utilização do DBA, que possibilita o surgimento de alterações em tempo real, na dimensão dos intervalos de tempo no sentido *upstream*, respondendo assim as variações de tráfego. Uma implementação típica contém um intervalo de tempo para gestão, outro para voz, e um para tráfego de dados em cada ONT.

A recomendação ITU-T G.984.3 descreve a camada GTC (*GPON Transmission Convergence*) como equivalente a camada de ligação dados do modelo OSI (*Open Systems*

Interconnection). A recomendação especifica o formato da trama GPON, o protocolo de controlo de acesso e processos de mensagens de controlo (OMCI, OAM e PLOAM). A Figura 2.9. mostra as estruturas de trama GTC de *downstream* e *upstream*, que têm uma duração de 125 μ s. A trama GTC de *downstream* consiste no PCBd (*Physical Control Block downstream*) - bloco de controlo físico – e a secção GTC Payload - carga útil. A estrutura GTC de *upstream* contém várias rajadas de transmissão. Cada rajada *upstream* consiste numa secção PLOu (*Physical Layer Overhead*) e um ou mais intervalos de alocação de largura de banda.

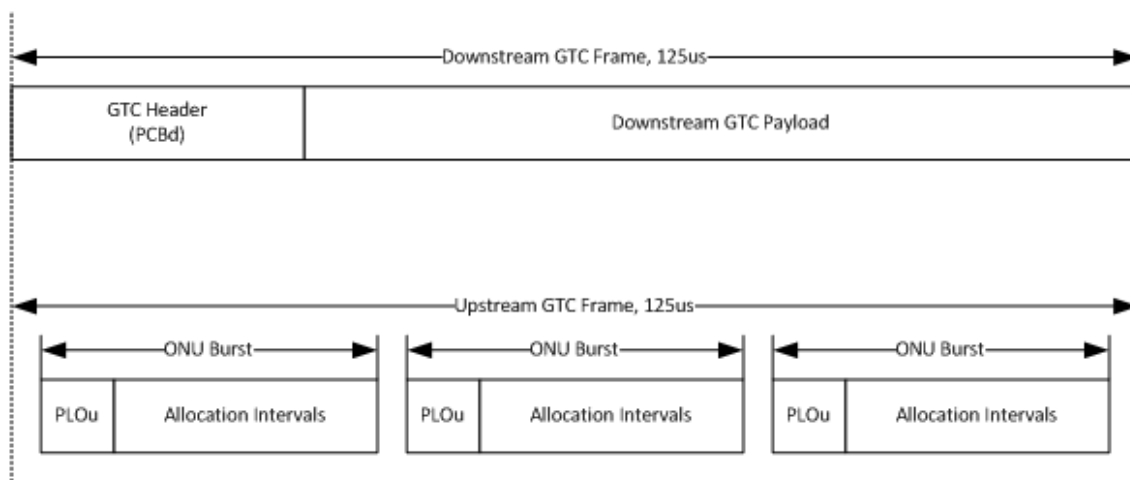


Figura 2.9. – Encapsulamento GPON. (Fonte: Fonte: ALU - GPON Fundamentals, 2012)

O PCBd compreende o Psync, Ident, PLOAMd, BIP, Plend e o Upstream BWmap. O GTC Payload compreende três tramas GEM, e cada trama GEM é composta por um *Header* e um *Payload* [12].

2.7.1.3. XG-PON (10G-PON) | ITU-T G.987 Series

O XG-PON é a versão sucessora do GPON, que foi lançada em Outubro de 2010 pelo ITU-T e que usa os mesmos meios de funcionamento que a antecessora. Possui um débito máximo de 10 Gbps, com um rácio de *splitting* de 1:64, a uma distância máxima de 20 km. Tem coexistência WDM com o GPON e com *Video RF Overlay* pois ocupa diferentes comprimentos de onda (utiliza os mesmos comprimentos de onda que o 10G-EPON lançado um ano atrás pelo IEEE). No sentido *downstream*, a norma define a gama de comprimentos

de onda de 1575 a 1580 nm, no sentido *upstream*, é utilizada a gama de comprimentos de onda de 1260 a 1280 nm. Sendo uma rede de acesso do tipo PON, a arquitetura típica XG-PON segue os seus moldes e como tal, os únicos equipamentos ativos são o OLT e o ONT. A inclusão do XG-PON numa ODN dimensionada para o GPON não implica mudanças na mesma, esse é grande trunfo desta tecnologia. Na Figura 2.10. podemos observar um cenário de coexistência GPON e XG-PON. [13]

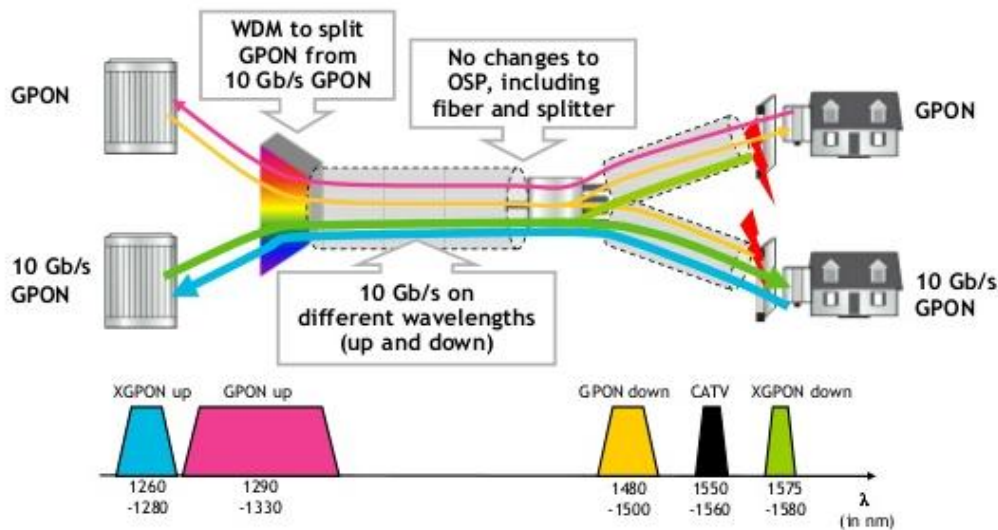


Figura 2.10. – Coexistência GPON e XG-PON. (Fonte: ALU - GPON Training 1)

Existem 2 modos de operação no XG-PON, que se traduzem em diferentes velocidades de transmissão: o XG-PON1 corresponde a uma taxa de transmissão de 10 Gbps no sentido *downstream* e 2,5 Gbps no sentido *upstream*. Já o XG-PON2 corresponde a uma taxa de transmissão simétrica de 10 Gbps. Em virtude dos desafios tecnológicos que precisam de ser superados de modo a que seja possível construir blocos baratos e capazes de transmitir rajadas de *upstream* de 10 Gbps, neste momento, a recomendação XG-PON (G.987) apenas está focada em XG-PON1 (10/2,5 Gbps).

2.7.1.4. NG-PON2 (TDWM-PON) | ITU-T G.989 Series

O grupo de trabalhos do FSAN considerou várias opções para NG-PON2. Entre as tecnologias estudadas sugeridas para suportar os requisitos de largura de banda de 40 Gbps, estiveram equacionadas, entre outras, as seguintes opções: 40G TDM-PON, TWDM-PON e

WDM-PON que se encontram ilustrados na Figura 2.11. Podemos também ver as principais diretrizes para a seleção dos candidatos a NG-PON2 [14]

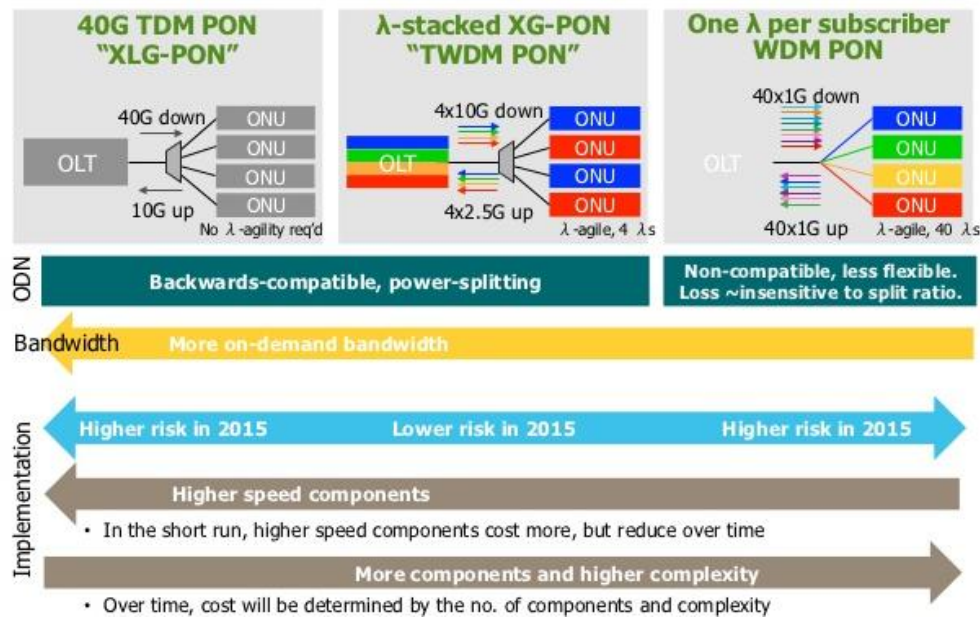


Figura 2.11. – Principais candidatos a NG-PON2. (Fonte: ALU - Active Technologies, *The Sky is the limit*, 2012)

Entre estas, a tecnologia TWDM-PON foi considerada pela FSAN como sendo a solução para o NG-PON2, porque do ponto de vista dos operadores é considerado menos arriscado, menos disruptivo e mais barato do que as outras soluções, o que contribuiu de forma significativa para um grande avanço na normalização.

Em TWDM-PON existem quatro comprimentos de onda multiplexados para a montante e a jusante. Numa rede NG-PON2 existem três tipos de débito (por comprimento de onda): 10 Gbps simétricos; 2,5 e 10 Gbps de *upstream* e *downstream* respetivamente, e 2.5 Gbps simétricos. Portanto, as capacidades de transmissão para cada débito de linha são ($4 \times \lambda$): 40 Gbps simétricos, a 10 e 40 Gbps *upstream* e *downstream* respetivamente, e 10 Gbps simétricos. No entanto o NG-PON2 pode suportar até 8 pares de λ s e atingir velocidades de 80 Gbps como podemos observar na Figura 2.12.

Em G.989.1, a taxa de divisão lógica e a distância de transmissão são especificadas como 1:256 e 40 km, respetivamente. No entanto, a capacidade ótima, recomenda os 20 km de distância, e 1:64 rácio de divisão.

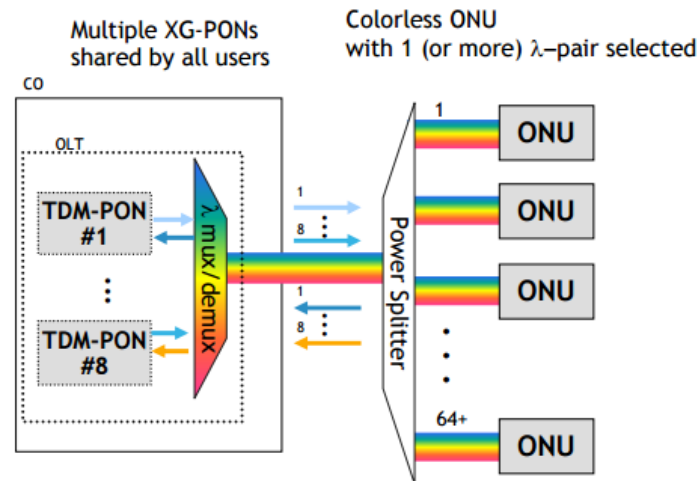


Figura 2.12. – Tecnologia TWDM. (Fonte: ALU - Active Technologies, *The Sky is the limit*, 2012)

O NG-PON2 foi projetado para coexistir com as tecnologias anteriores para facilitar a implantação em redes de distribuição óticas existentes. Os comprimentos de onda, ilustrados na Figura 2.13. e 2.14. foram meticulosamente escolhidos para evitar a interferência com as tecnologias anteriores.

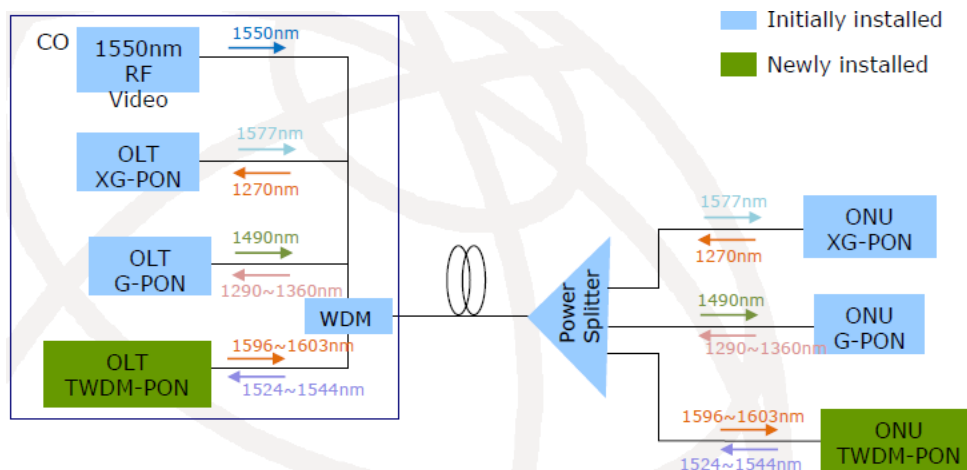


Figura 2.13. – Coexistência NG-PON2 com tecnologias PON anteriores. (Fonte: Joint ITU/IEE - *Progress in Optical Access*, 2012)

Os comprimentos de onda para NG-PON2 especificados em G.989.2 [15] são mostrados de uma forma mais clara na Figura 2.14, juntamente com os comprimentos de onda de outros de sistemas. Para possibilitar a coexistência com os sistemas legados PON que

incluem um sistema de vídeo RF (radiofrequência), o G.989.2 especifica os comprimentos de onda de 1524-1544 nm (opção de banda larga) e 1596-1603 nm, para o *upstream* e *downstream*, respectivamente. Duas outras opções também são especificadas para o *upstream*: uma opção de banda reduzida (1528-1540 nm) e uma opção de banda estreita (1532-1540 nm). Essas três opções são especificadas, tendo em conta os espaçamentos do canal (min. 50 GHz, máx. 200 GHz) e componentes sintonizáveis implementados nos ONTs. [16]

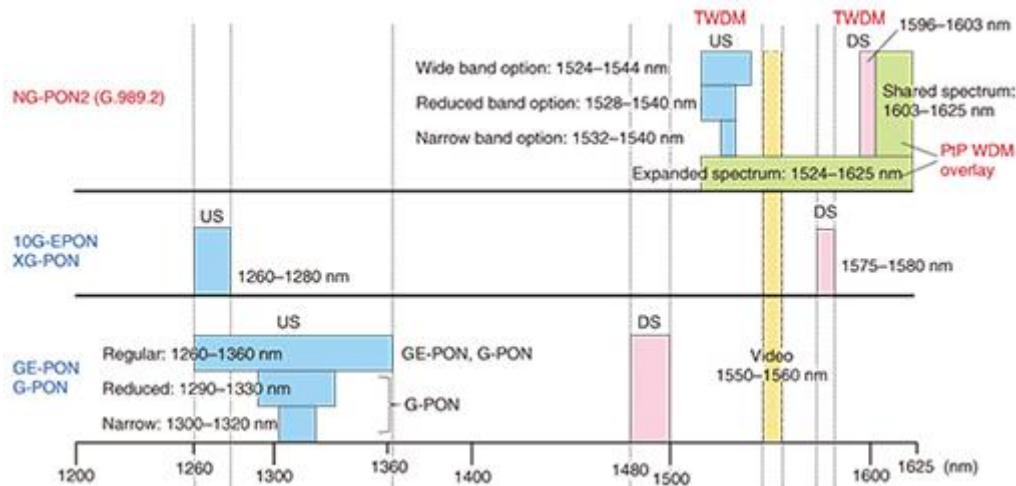


Figura 2.14. – Comprimentos de onda das tecnologias PON atuais. (NTT - Standardization Trends for NG-PON2, 2014)

A simplicidade do formato da modulação NRZ posiciona-lhe bem para o uso em EPON, 10G-EPON, GPON, XG-PON1 e NG-PON2. Em débitos de 25Gbps num único comprimento de onda, a tolerância de dispersão de sinais transmitidos na banda S de dispersão zero usando NRZ é suficiente para o comprimento padrão de 20 km de fibra ótica dos sistemas PON. Usando bandas com dispersão positiva como a banda C ou a banda L resulta numa tolerância de dispersão inadequada. Nesse caso, são necessários métodos de compensação de dispersão óticos ou elétricos [17]. Para o PtP WDM, é proposto a utilização do espectro partilhado (1603-1625 nm), especificado para coexistência. No entanto existe a possibilidade de utilizar o espectro expandido (1524-1625 nm). G.989.2 não especifica o número de comprimentos de onda ou a atribuição de comprimentos de onda.

2.7.2. Tecnologias PON do Grupo IEEE

Em junho de 2004, o IEEE - entidade que reúne engenheiros e cientistas da computação de todo o mundo e responsável pela publicação de inúmeros padrões utilizados em engenharia e computação – aprovou o padrão denominado IEEE 802.3ah, que define protocolos e tecnologias para o EFM (*Ethernet in the First Mile*) – *Ethernet* na Primeira Milha. As sub-áreas deste padrão abrangem ponto-a-ponto a cobre, ponto-a-ponto a fibra ótica, ponto-a-multiponto em fibra ótica e Operação, Administração e Manutenção (OAM – *Operation, Administration, and Maintenance*). As redes óticas passivas designadas por EPON, utilizam o protocolo *Ethernet* para o acesso e são semelhantes ao GPON. Algo que se acordou relativamente as várias tecnologias do IEEE e do ITU-T, para BPONs, GPONs, e EPONs é que os dados e a voz sentido *downstream*, usam o comprimento de onda de 1490 nm e no sentido *upstream*, o comprimento de onda de 1310 nm.

2.7.2.1 EPON | IEEE 802.3ah

O IEEE definiu o 802.3ah, denominado *Ethernet in the first mile*, para expandir a aplicação do *Ethernet* de modo a incluir as redes de acesso de forma proporcionar um aumento significativo no desempenho, minimizando equipamentos, operações e custos de manutenção. Em termos de escalabilidade económica, a *Ethernet* permite fornecer uma simples e fácil gestão da conectividade, nos equipamentos IP em ambos os extremos da rede (as tecnologias PON do grupo FSAN/ITU-T, que têm como base o padrão ATM não usufruem desta vantagem). Utiliza a PON como base para construir uma topologia em fibra P2MP que suporta velocidades de 1 Gbps até uma distância de 20 km, nos comprimentos de onda *downstream* e *upstream* de, respectivamente, 1490 e 1310 nm.

A tecnologia EPON é implementada usando uma topologia em árvore e divisores óticos de 1:N. A taxa máxima de divisão disponível para esta tecnologia é de 1:32. Uma rede EPON, inclui OLTs, *splitters*, ONTs. O OLT fica situado no CO, onde habitualmente existe um *switch Ethernet* ou uma outra plataforma de conversão de multimédia. A ONT fica situado no edifício ou na própria residência, e um ONT EPON tem uma interface WAN 802.3ah onde recebe o sinal e uma interface 802.3 para o utilizador.

A especificação 802.3ah define o MPCP (*Multi-Point Control Protocol*) que possibilita o controlo da rede P2MP. É responsável atribuição de largura de banda, verificação

da largura de banda, processo de autodescoberta dos dispositivos e *ranging*. O MPCP é implementado na camada MAC, introduzindo um novo tipo de mensagens de controlo de 64 bytes. Essas mensagens são designadas como *GATE* e *REPORT* e que têm como propósito atribuir e requisitar largura de banda e a mensagem *REGISTER* para controlar o processo de descoberta automática. O *ranging* é utilizado para reduzir o espaçamento das transmissões, relatórios de largura de banda, satisfazendo os requisitos dos ONTs para o DBA. Os parâmetros óticos são negociados para otimizar o desempenho do sistema. Nas operações do ONT existem processos de descoberta automática que incluem o *ranging* e a atribuição dos *Logical Links ID* e da largura de banda. Não existem colisões e também não há fragmentação de pacotes. Em resumo, o EPON é propício para aplicações de dados. Os sistemas típicos baseados em EPON poderão incluir características extras, tais como segurança, autenticação e alocação de largura de banda dinâmica [18] [19]. Como ilustrado na Figura 2.15., em *downstream*, tramas 802.3 são enviadas em *broadcast* e extraídas através da identificação *Logical Link ID* existente no preâmbulo.

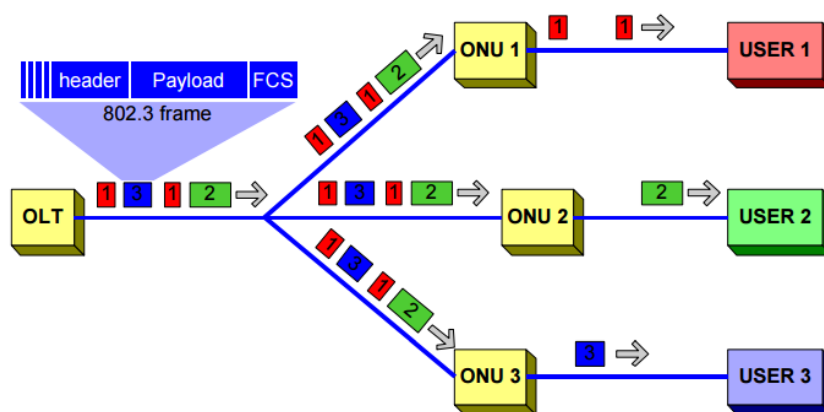


Figura 2.15. – Downstream em EPON. (Fonte: H. Fawsi - *Optical networking technologies*, 2012)

Na Figura 2.16. temos processo de *upstream*. O controlo em *upstream* é feito pelo protocolo MPCP. *Time slots* contendo múltiplas tramas *Ethernet* 802.3 são controlados sem haver colisões nem fragmentação de pacotes.

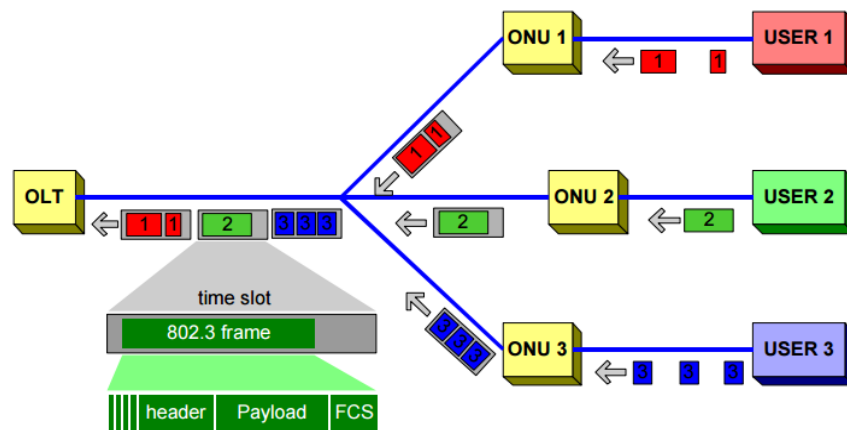


Figura 2.16. – Upstream em EPON. (Fonte: H. Fawsi - *Optical networking technologies*, 2012)

2.7.2.2. 10G-EPON | IEEE 802.3av

O 10G-EPON é a evolução natural do EPON e foi desenvolvida de forma a garantir débitos de até 10 Gbps [20]. A especificação no IEEE, 802.3av, foi aceite em 2007 e sua revisão final em 2009, e iniciaram-se implementações de 10G-EPON em 2010. Pode operar em modo simétrico a 10Gbps ou assimétrico 10Gbps/1Gbps (*down/up*) e garante coexistência WDM com o EPON.

Para garantir a coexistência da transmissão a 1Gbps com a de 10Gbps sobre a mesma fibra ótica, é feita a multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM) para transmitir os dados no *downstream* (o que obriga, aquando da introdução do 10G-EPON, a substituição do OLT por um que suporte todos os comprimentos de onda e que tenha a capacidade de diferenciar o tráfego no *upstream*. O 10G-EPON não permite por isso uma evolução gradual). A Figura 2.17. ilustra uma OLT dual Rate que possibilita a coexistência EPON e 10G-EPON.

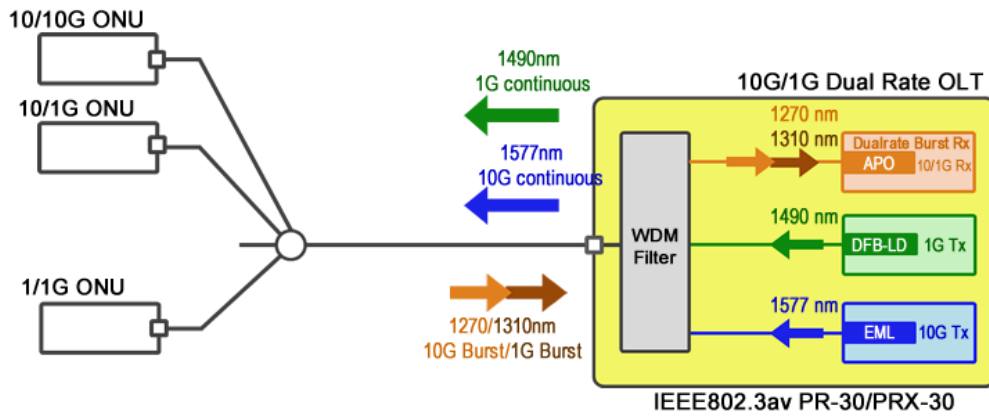


Figura 2.17. – Coexistência tecnologias EPON e 10G-EPON. (Fonte: NEC, 2015)

Como se pode observar na Figura 2.18., em *downstream*, a transmissão a 1Gbps está limitada a banda de 1480-1500 nm e a transmissão a 10Gbps está na banda de 1575-1580 nm. Em *upstream* as bandas sobrepõem-se, ou seja, a transmissão a 1Gbps espalha-se de 1260 a 1360 nm e a transmissão a 10Gbps na banda de 1260 a 1280 nm. Isto possibilita que em ambos os casos, o *upstream* beneficie da região do espectro caracterizada por baixa dispersão cromática mas exige que seja feita uma multiplexagem no tempo (TDMA) dos canais de *upstream*.

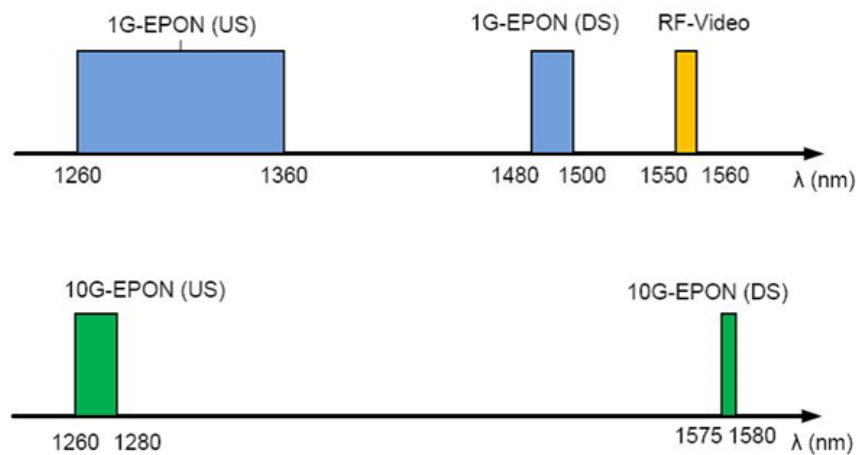


Figura 2.18. – Plano de λ : EPON e 10G-EPON. (Fonte: Zeitgeist Optical Laboratory - EPON, 2016)

As transmissões em *burst* de diferentes ONUs podem dessa forma apresentar diferentes velocidades, este método é denominado de *dual-rate* TDMA. A Tabela 2.4. ilustra os tipos de ONUs suportados consoante o tipo de OLT implementado.

<i>OLT</i>	<i>ONU suportadas</i>
<i>Downstream: 2 λ</i>	1G-EPON ONU
<i>Upstream: single rate</i>	10/1G-EPON ONU
<i>Downstream: 1 λ</i>	10/1G-EPON ONU
<i>Upstream: dual rate</i>	10/10G-EPON ONU
<i>Downstream: 2 λ</i>	1G-EPON ONU
<i>Upstream: dual rate</i>	10/1G-EPON ONU
	10/10G-EPON ONU

Tabela 2.4. – Tipo de OLT e ONU suportadas.

Na Tabela 2.5. temos a gama de *power budgets* norma definidos pela norma, denotados por PX, PR ou PRX. PX descreve débito simétrico operando a 1 Gbps, PRX descreve débito o assimétrico 10 Gbps *downstream* e 1 Gbps *upstream* e PR descreve débito simétrico operando a 10 Gbps.

<i>Classe</i>	<i>Aplicação</i>	<i>Down</i>	<i>Up</i>
<i>PX</i>	EPON	1G	1G
<i>PRX</i>	10G-EPON	10G	1G
<i>PR</i>	10G-EPON	10G	10G

Tabela 2.5. – Quadro resumo classes EPON.

Na Tabela 2.6. podemos observar as classes óticas definidas pela norma.

<i>Classe</i>	<i>Aplicação</i>	<i>Budget</i>
<i>10</i>	10 km, 1:16	20
<i>20</i>	20 km, 1:16; 10 km, 1:32	24
<i>30</i>	20 km, 1:32	29
<i>40</i>	20 km, 1:64	33

Tabela 2.6. – Quadro resumo buget ótico.

2.7.3. Tecnologias AON do Grupo IEEE

Como já foi mencionado anteriormente, uma rede AON é muito semelhante a uma rede PON, no entanto, existem três principais diferenças. Em primeiro lugar, em vez de ter *splitters* passivos (e incontroláveis) na rede, são usados equipamentos *Ethernet* já amadurecidos no mercado para fornecer agregação na rede de acesso de fibra. Em segundo lugar, em vez de compartilhar a largura de banda entre vários assinantes, a cada assinante final é fornecido um canal dedicado que proporciona total largura de banda bidirecional. A terceira diferença entre arquitetura PON e a AON é a limitação de distância. Numa rede PON, o assinante mais distante deve estar, tipicamente, a 20km da CO no máximo, dependendo do número total de divisões. Uma rede AON, por outro lado, tem um raio típico de até 80 km, independentemente do número de assinantes a serem servidos, usando transmissores da norma 1000BASE-ZX (SMF; 1550 nm; 80 km) 1000BASE-EX (SMF; 1310 nm; 40 km). O número de assinantes é limitado apenas pela capacidade do *switch* de acesso, e não pela infraestrutura de rede, como no caso da rede PON.

2.7.3.1. P2P Ethernet (“Home Run” Ethernet)

As redes *P2P Ethernet Point-to-Point* usam fibras óticas dedicadas ao assinante [7], o que torna-se numa grande vantagem e ao mesmo tempo desvantagem. Vantagem na capacidade e escalabilidade e desvantagem no custo da infraestrutura. São bastante populares entre as empresas que necessitam de elevado débito.

Atualmente, interfaces de largura de banda física de 1 Gbps e 10 Gbps simétricos são comuns e muito requisitadas, no entanto, é possível, via *software*, ajustar a largura de banda efetivamente fornecida para um valor inferior a largura de banda física que se adeque a cada cliente. Para se aumentar a largura de banda de um determinado utilizador, por exemplo, de 1 Gbps para 10 Gbps, basta trocar o transmissor/recetor do equipamento do cliente e a interface no CO.

2.7.3.2. Active Ethernet (“Active” Ethernet)

O *Active Ethernet* pode ser visto como um *P2P Ethernet* em conjunto com um *switch* agregador. Baseia-se na opção de se utilizar uma única fibra partindo do CO até uma

localidade onde se concentrem vários utilizadores finais. A fibra terminara num *switch*, que é responsável por encaminhar os dados para cada utilizador individualmente através de outra fibra. Como se pode observar na Figura 2.19., a principal diferença entre a topologia P2P em conjunto com um *switch* no ponto de concentração e a topologia P2MP é que a primeira usa o *switch* para distribuir o sinal da fibra vinda do CO para os utilizadores finais; no P2MP usam-se *splitters* óticos passivos para segmentar o sinal da fibra em feixes separados para cada assinante.

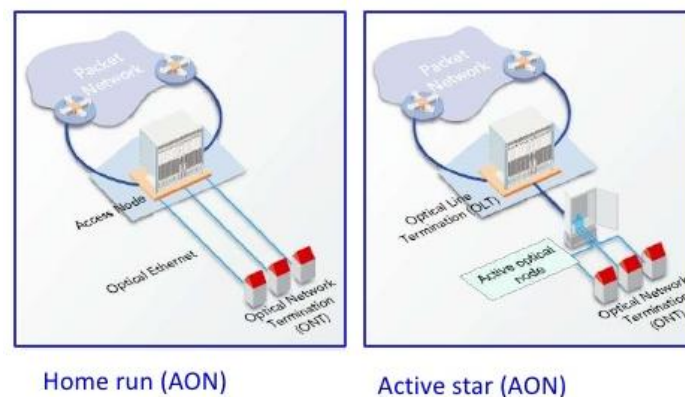


Figura 2.19. – AON: Home run e Active star. (Fonte: FTTH Council – Next Generation AON, 2011)

O *switch* recebe os sinais óticos vindos do CO ou dos utilizadores, convertendo-os para sinais elétricos e perfazendo processamento sobre os mesmos ao nível da camada dois (ligação de dados), de modo a obter o endereço MAC de destino. Em posse do endereço de destino, converte os sinais elétricos para sinais óticos e ilumina a fibra conectada na porta de saída correspondente ao destino correto. Desta maneira, os utilizadores finais vêem uma topologia ponto-a-ponto, pois uma fibra só recebe os sinais destinados ao equipamento nela conectada. Em adição, nesta topologia todos os utilizadores podem transmitir ao mesmo tempo sem risco de colisão, pois o *switch* isola os domínios de colisão e armazena as tramas em *buffers* quando o meio está momentaneamente ocupado.

A grande desvantagem do *Active Ethernet* é mesmo a necessidade de energia no *switch* agregador, o que torna a rede mais suscetível a falha do que uma rede PON. Mas com os tipos de serviços a evoluir para disponibilizar conteúdos de consumo intensivo de largura de banda, possuir dispositivos inteligentes no extremo da rede pode tornar-se numa vantagem significativa.

Para aplicações de vídeo, inteligência no extremo da rede permite fluxos de *multicast* para ser replicado para entrega jusante usando IGMP. Isto significa que independentemente de quantas pessoas a jusante do *switch* estão a assistir o mesmo canal, apenas um fluxo é retirado do *headend*. Esse fluxo de *multicast* é então replicado no comutador de acesso e enviado para os assinantes. Isto não só melhora a velocidade do *zapping*, como também faz um uso mais eficiente do *Core* da rede.

Outra vantagem de ter eletrônica ativa na ODN é a resiliência que pode obter ao ligar os diferentes nós. A gestão completa e capacidades de resolução de problemas, alta flexibilidade para a implantação de diversos serviços para clientes residenciais e comerciais, e baixos custos dos primeiros assinantes são outras vantagens interessantes.

2.8. Resumo das Tecnologias na Rede de Acesso Ótica

Em suma as tecnologias apresentadas possuem capacidades e características específicas, que podem levar a escolha de uma em detrimento de outra dependendo da aplicação em causa.

A Tabela 2.7. apresenta um resumo das características das tecnologias aqui abordadas.

	<i>GPON</i>	<i>EPON</i>	<i>XG PON</i>	<i>10G EPON</i>	<i>NG PON2</i>	<i>P2P/Active Ethernet</i>
<i>Norma</i>	ITU G.984	IEEE 802.3ah	ITU G.987	IEEE 802.3av	ITU G.989	IEEE 802.3ae
<i>Protocolo</i>	GEM: TDM, ATM, Ethernet	Ethernet	GEM: TDM, ATM, Ethernet	Ethernet	GEM: TDM, ATM, Ethernet	Ethernet
<i>Débito down/up [Gbps]</i>	2,5 / 1,25 ou 2,5 / 2,5	1,25 / 1,25	XG-PON1 10 / 2,5 XG-PON2 10 / 10	10 / 1,25 ou 10 / 10	40 / 40 (4x10G) 40 / 10 (4x10G) 10 / 10 (4x2,5G)	1 / 1 ou 10 / 10
<i>CDO down [nm]</i>	1480-1500	1480-1500	1575-1580	1575-1580	TWDM: 1596-1603	
<i>CDO up [nm]</i>	1310 ± 20	1310 ± 20	1260-1280	1310 ± 50 ou 1310 ± 20	TWDM: 1524-1544 (Wide) 1528-1540 (Reduced) 1532-1540 (Narrow)	PtP WDM: 1603-1625 (Shared) 1524-1625 (Expanded) 850 1310 1550

<i>Splitting máximo</i>	1:128	1:64	1:128	1:64	1:256	1:1
<i>Splitting típico</i>	1:64	1:32	1:64	1:64	1:128	1:1
<i>Alcance máximo [km]</i>	20 (A, B, C) 40 (B+, C) 60 (C+)	PX10 ≥10 (1:16)	20 40	PRX10 ≥10 (1:16)	N1 ≥20 E1 ≥40	20 40 80
		PX20 ≥10 (1:32) ≥20 (1:16)		PRX20 ≥10 (1:32) ≥20 (1:16)		
		PX30 ≥20 (1:16)		PRX30 ≥20 (1:16)		
		PX40 ≥20 (1:16)		PRX40 ≥20 (1:16)		
<i>Alcance Recomendado [km]</i>	20 km	20 km	20 km	20 km	20-40 km	20 km

Tabela 2.7. – Quadro resumo tecnologias em análise.

Capítulo

3

Fatores Influentes para o Consumo Energético

Redes óticas passivas são implementadas atualmente pelos operadores em vários países, oferecendo larguras de banda que respondem as exigências e capazes de atingir os 40 Gbps (NG-PON2). Este aumento de débito esta diretamente relacionado com o aumento do consumo energético na rede de acesso.

O aumento do débito, o aumento do preço da energia e o aumento dos gases de efeito de estufa tornaram a eficiência energética nas redes de acesso num fator importante a ter em consideração pelas operadoras, nomeadamente no que toca a análise das despesas operacionais e a crescente conscientização sobre as mudanças climáticas [19]. A imprevisibilidade de fatores como o preço dos equipamentos de transmissão, o preço da eletricidade, a evolução tecnológica e adicionando a estes, os fatores técnicos de penetração do serviço, débitos e escalabilidade/longevidade tornam a avaliação do consumo energético na rede de acesso num processo complexo e de difícil precisão.

3.1. Tráfego de Dados

O tráfego de dados, sem dúvida, experiencia aumentos significativos e espera-se que em 2016 o trafego IP atinja, valores globais, acima de 1 Zb (1 *Zettabyte* = 1000 *Exabytes*). O crescimento IP global, em 2016, terá valores acima dos 88,4 *Exabytes* por mês e uma CAGR de 23% para o período 2014-2019 [21]. Estes e outros valores podem ser analisados na Tabela 3.1.

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	CAGR
By Type (Petabytes [PB] per Month)							
Fixed Internet	39,909	47,803	58,304	72,251	90,085	111,899	23%
Managed IP	17,424	20,460	23,371	26,087	29,274	31,858	13%
Mobile data	2,514	4,163	6,751	10,650	16,124	24,221	57%
By Segment (PB per Month)							
Consumer	47,740	58,137	71,453	88,730	111,015	138,415	24%
Business	12,108	14,289	16,973	20,258	24,469	29,563	20%
By Geography (PB per Month)							
Asia Pacific	20,729	24,819	29,965	36,608	44,223	54,434	21%
North America	19,628	23,552	28,219	33,641	41,458	49,720	20%
Western Europe	9,601	11,231	13,506	16,396	20,046	24,680	21%
Central and Eastern Europe	4,087	5,270	6,896	9,385	12,601	16,863	33%
Latin America	4,297	5,373	6,663	8,299	10,355	12,870	25%
Middle East and Africa	1,505	2,180	3,178	4,659	6,800	9,412	44%
Total (PB per Month)							
Total IP traffic	59,848	72,426	88,427	108,988	135,484	167,978	23%

Tabela 3.1. – Tráfego IP, 2014 – 2019

Estes números mostram como os utilizadores estão a mudar os seus hábitos em relação à banda larga, especialmente em relação à sua utilização, optando cada vez mais por aplicações de consumo intensivo de dados tais como conteúdos vídeo em alta resolução (HD e UHD, 4K), recurso a computação em nuvem, jogos *online* de multijogadores massivo e realidade aumentada (entre outros).

Quanto a perspectivas para 2020, nas redes fixas, é assumido que o débito garantido aumente para os 30 Mbps para redes fixas, para todos os utilizadores e 100 Mbps para 50% dos utilizadores, de acordo com a política europeia e as perspectivas industriais correntes. No caso das redes fixas, os objetivos definidos em 2020, exigem que as OLTs sejam alteradas para aumentar a capacidade fornecida.

Como mencionado nas seções anteriores, os níveis de consumo de energia de rede são altamente dependentes do débito por assinante e os especialistas consideram o vídeo de alta resolução como sendo o recurso mais exigentes a rede.

3.2. Equipamentos de Rede

Existem três estratégias principais e mutuamente compatíveis de aumentar a eficiência energética de redes no que toca aos dispositivos ativos. A primeira é a execução de um projeto de arquitetura de rede que visa reduzir o consumo energético. No entanto, isso raramente é o caso, visto que as arquiteturas de rede são normalmente concebidas para cumprir as metas de cobertura específicos. A segunda estratégia é possibilitar melhorias a nível de sistema e de rede, na definição de novas funções, mecanismos de gestão de rede e algoritmos dinâmicos de gestão de recursos. Estas características são normalmente implementadas ao nível do *software* e potencializadas na rede ao longo de várias gerações de *hardware*. Estas potenciais melhorias podem ser alcançadas, por exemplo, pelo uso de técnicas para gerenciar faixas descontínuas de tempo de transmissão durante o funcionamento do dispositivo, ou através da análise dos requisitos de rede e “ensinando” a rede a responder de forma mais dinâmica e inteligente, colocando seções e/ou equipamentos específicas em *sleep mode*. A terceira e mais evidente possibilidade é implementada ao nível do *hardware* do dispositivo, utilizando componentes tecnologicamente mais avançados que sejam energeticamente mais eficientes, quer numa nova implementação ou na substituição do equipamento existente assim que a amortização do investimento em *hardware* tenha ocorrido. Neste estudo, são feitas a primeira e a terceira abordagens. A rede é dimensionada a medida e os dispositivos mais eficientes energeticamente são implementados na rede.

Os cálculos do consumo de energia da rede são baseados no consumo derivado dos dispositivos ativos colocados no interior da rede. Em arquiteturas PON, os dois principais tipos de equipamentos ativos são a OLT da central local, e a ONT colocada nas instalações do assinante. Além da energia bruta consumida para o funcionamento da OLT na CO, um fator adicional deve ser adicionado ao nível de consumo por causa dos requisitos de arrefecimento dos equipamentos. O ONT tem um fator de arrefecimento que se aproxima de zero, porque o seu processo de arrefecimento ocorre de forma passiva e, portanto, não consome energia nesse processo.

Na arquitetura PON, um ou mais pontos de distribuição são colocados entre a CO e o assinante (normalmente são colocados dois *splitters*), dividindo o sinal. Estes divisores, como dispositivos passivos, não contribuem para o consumo de energia da rede, mas o seu número afeta o nível de potência do sinal transmitido para e a partir das instalações do cliente.

Na tecnologia *P2P Ethernet* não existem dispositivos passivos que dispersem a energia entre a CO e as instalações do cliente, sendo que os consumidores de energia são o OLT/*Switch* que se encontra na CO e o ONT/CPE nas instalações do cliente.

Em *Active Ethernet*, ao consumo de energia do OLT/*Switch* na CO deve-se contabilizar o consumo do *Switch* de rua e o OLT/CPE nas instalações do cliente. Neste caso temos diferentes requisitos de energia. O *switch* de rua colocado no armário, responsável pela distribuição e agregação de sinais provenientes da CO e do assinante, acrescenta consumo ao equilíbrio energético.

Um OLT é um equipamento agregador de assinantes que tipicamente se situa no CO do operador de telecomunicações. Tem como principais funções possibilitar o acesso a cada utilizador de rede e realizar tarefas de gestão na rede, tais como controlo de acesso, DBA e disponibilização de serviços, coordenando a multiplexagem entre os ONTs que se encontram no outro extremo da rede. O OLT recebe o tráfego Ethernet através de suas interfaces de *uplink* e disponibiliza-o em sinal ótico de acordo com um determinado padrão (por ex. GPON), atendendo aos requisitos da norma associada a esse padrão (ITU-T G.984 no caso do GPON). Tal sinal é transportado pela rede até o equipamento de acesso dos assinantes, o ONT. Estes, por sua vez, enviam seus respectivos sinais óticos no sentido contrário da rede, até ao OLT, fechando o enlace de comunicação.

O OLT é composto por diversos componentes. A nomenclatura utilizada para a identificação desses componentes não se encontra estandardizada sendo comum existirem diversas denominações para um só componente. Um OLT é composto por um chassi (de tamanho variável, ventilado) que possui um determinado número de *slots*. Os *slots* abrigam os módulos (também denominadas de cartas). Os módulos subdividem-se nos seguintes grupos [22]:

- Módulos *Switch Fabric* (também denominados de CSM – *Control and Switch Module* ou PSM - *Platform Switch Module*) que integram funções de *switching* de L2/L3, controlo e gestão do tráfego proveniente das ONT;
- Módulos de Acesso (ou de serviço, ou de assinante ou PIM - *Platform Interface Modules*), que possuem as interfaces PON ou Ethernet que se

conectam às ONT dos assinantes, através da ODN. Um módulo de acesso possui várias interfaces, também conhecidas por portas ;

- Módulos de *Uplink* (ou de rede) que são responsáveis pelo envio dos dados para a rede de transporte. Os dados são enviados pelas suas interfaces, em Ethernet, a ritmos de Gbps.

Na Figura 3.1 temos a representação de uma OLT e os seus componentes sendo que:

1. Chassi
2. Módulo de Uplink
3. Módulo de Acesso PON (16 portas)
4. Módulos Switch Fabric
5. Módulo de Acesso Ethernet (48 portas)



Figura 3.1. – OLT Cisco ME 4600. (Fonte: Cisco, 2016)

Nas Figuras 3.2. a 3.5 temos a representação dos componentes mencionados anteriormente.



Figura 3.2. – Módulo Switch Fabric. (Fonte: Cisco, 2016)



Figura 3.3. – Módulo de acesso PON. (Fonte: Cisco, 2016)



Figura 3.4. – Módulo de Uplink. (Fonte: Cisco, 2016)



Figura 3.5. – Módulo de Acesso Ethernet. (Fonte: Cisco, 2016)

Podem existir outros módulos tais como o módulo das fontes de alimentação (-48VDC) que neste caso está integrado no chassi e não ocupa *slots*. Alguns fabricantes apresentam um módulo GPIO (*General Purpose Input/Output*) que consiste em portas programáveis de entrada e saída de dados que são utilizadas para prover uma interface entre os periféricos e os microcontroladores/microprocessadores. Outros componentes do OLT são as unidades de ventilação, os filtros de poeira e os organizadores de fibra ótica.

De seguida são apresentadas as características técnicas do OLT selecionado para o estudo, o Cisco ME 4620. Nas Figuras 3.1. pode-se observar o OLT Cisco ME 4620, que dependendo do tipo de cartas, podem funcionar em redes PON ou AON. Nas Tabelas 3.2. a 3.4. temos as características técnicas associadas a este equipamento.

<i>Características</i>	<i>Cisco ME4620 OLT</i>
<i>Total Slots</i>	20
<i>Line Card Slots</i>	18
<i>Switch Matrix Slots</i>	2
<i>Uplink Slots</i>	2
<i>Service Slots</i>	16

Tabela 3.2. – Chassis Cisco ME 4620 OLT [23].

<i>Type of Unit</i>	<i>Unit Name</i>	<i>Power Consumption (W @ -48VDC)</i>
<i>Chassis</i>	Cisco ME4620 OLT	< 60 (fan module)
<i>Switch Matrix card</i>	Cisco XCO-640	< 180
<i>Uplink line card</i>	Cisco UMX-10G4	< 40
<i>GPON line card</i>	Cisco AMX-16G	< 90
<i>XG-PON1 line cards</i>	Cisco AMX-16XG	< 210

<i>NG-PON2 line cards</i>	Cisco AMX-16NG	< 320
<i>Ethernet line card</i>	Cisco AMX-48GE	< 120

Tabela 3.3. – Características de potência OLT Cisco ME 4620 [23].

A Tabela 3.4. apresenta um resumo da capacidade da OLT Cisco ME 4620.

<i>OLT</i>	<i>Switching — Backplane Bus</i>	<i>Switching — Control Board</i>	<i>GPON/ EPON ports</i>	<i>XG- PON1/1 0G- EPON ports</i>	<i>NG- PON 2</i>	<i>Gigabit Ethern et ports</i>	<i>10 Gigabit Ethern et ports</i>	<i>Switch Fabric Card</i>	<i>Uplink Card</i>
<i>Cisco ME 4620</i>	2.4 Tbps	8.6 Tbps	16*16 =256	16*8 =128	16*8 =128	16*48 =768	18*4 =72	640 Gbps	4*10 =40GE

Tabela 3.4. – Resumo capacidade da OLT Cisco ME 4620 [23].

Na Tabela 3.5. encontram-se os valores teóricos de consumo por porto das OLTs, baseados no *European Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment V5* [24]. Estes valores serão usados para as futuras análises, quando aplicáveis.

<i>Tecnologia OLT</i>	<i>Potência / porto OLT port (W)</i>
<i>GPON (2.5G/1G)</i>	5,6
<i>EPON (1G/1G)</i>	5,5
<i>10G/1G EPON</i>	12,6
<i>10G/10G EPON</i>	14,0
<i>XG-PON1 (10G/2.5G)</i>	13,0
<i>NG-PON2</i>	20
<i>PtP 1Gbps</i>	2,8
<i>PtP 10Gbps</i>	18

Tabela 3.5. – Valores de consumo para OLTs, por porto [24].

Na Figura 3.6. temos representado o ONT-SFU Cisco ME 4620.



Figura 3.6. – Cisco ME 4620 ONT-SFU. (Fonte: Cisco, 2016)

Em termos de consumo energético, O Cisco ME 4620 cumpre os valores de potência máximos estipulados pelo *European Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment V5* [24], com um consumo máximo de 4W. O seu consumo encontra-se apresentado na Tabela 3.6., juntamente com os valores para os equipamentos terminais das outras tecnologias.

<i>Tecnologia ONT</i>	<i>Consumo ONT [W] (On-State)</i>
GPON (2.5G/1G)	3,2
EPON (1G/1G)	3,2
10G/1G EPON	5,0
10G/10G EPON	6,2
XG-PON1 (10G/2.5G)	5,4
NG-PON2	10,4
PtP 1Gbps	3,0
PtP 10Gbps	3,0

Tabela 3.6. – Valores de consumo para ONT [24].

Cada um dos dispositivos ativos possui um determinado perfil de energia. Estas funções comportamentais determinam os diferentes níveis de consumo para os dispositivos de acordo com a carga da rede, ao longo de um período de tempo, no entanto não há uma consistência sobre estes perfis. Nesta dissertação, os dispositivos quando em funcionamento, são considerados como estando no seu estado de consumo máximo.

As figuras de consumo, aplicáveis a interface *uplink* do OLT (por interface) são as apresentadas na Tabela 3.7.

<i>Interface Uplink OLT</i>	<i>Power W/port [W]</i>
GPON (2.5G/1G)	4,0
EPON (1G/1G)	2,0
10G/1G EPON	5,0
10G/10G EPON	6,0
XG-PON1 (10G/2.5G)	6,0
NG-PON2	24,0
PtP 1Gbps	2,0
PtP 10Gbps	6,0

Tabela 3.7. – Valores de consumo para interfaces Uplink, por porto.

As tecnologias candidatas para análise já foram selecionadas e apresentadas no Capítulo 2. Na Tabela 3.8. pode ser visto que o consumo de energia por porta PON OLT aumenta quando a largura de banda da PON aumenta. Para servir mais utilizadores, mais processamento digital de sinal e (em alguns casos) transmissores e recetores adicionais são necessários.

<i>Tecnologia</i>	<i>Perdas máx. ODN (dB)</i>	<i>LB/PON DS/US (Gb/s)</i>	<i>PONs/chassis</i>	<i>Potência/porto OLT (W)</i>	<i>Potência/porto ONT (W)</i>
GPON (B+)	28	2.5/1.25	256	5.6	3.2
EPON (B+)	28	1.25/1.25	256	5.5	3.2
10G/1G – EPON(PR-40)	33	10/1.25	128	12.6	5.0
10G/10G – EPON(PR-40)	33	10/10	128	14	6.2
XG PON1 (E2)	35	10/2.5	128	13	5.4
NG PON2 (E2)	35	4x10/4x2.5	128	20	10.4
P2P/Active Ethernet 1G	-	1/1	-	2.8	3.0
P2P/Active Ethernet 10G	-	10/10	-	18	3.0

Tabela 3.8. - Valores de consumo de energia ONUs e portos OLT GPON e Ethernet.

3.3. Design de Rede

De acordo com a abordagem de *design* de rede usual, os principais parâmetros de rede são o débito por utilizador, a QoS e a (esperada) penetração. O dimensionamento da rede depende de todos estes parâmetros e, portanto, o mesmo acontece com o consumo de energia da rede. Visto que se pretende comparar vários parâmetros, é necessário, para determinadas

análises, existir uma topologia de rede base já dimensionada, na qual as tecnologias em estudo sejam comparadas de igual forma no que toca ao número total de utilizadores. Cada um desses parâmetros é brevemente discutido abaixo, ficando os resultados e discussões para o Capítulo 4 e as Conclusões para o Capítulo 5.

O débito médio e de pico, a quantidade de tempo que um determinado débito é garantido aos utilizadores - ou alternativamente, o número de utilizadores que podem ser servidos simultaneamente com um determinado débito - é especificado pelo QoS. Na verdade, o QoS é sem dúvida o parâmetro de projeto que mais afeta a implementação de uma rede e, portanto, o seu consumo de energia. Embora os níveis de QoS sejam atualmente considerados médios, espera-se que a evolução da procura de débitos mais altos e novas aplicações e serviços seja de acordo com o aumento dos níveis de QoS oferecidos aos utilizadores, logo acompanhados de um aumento do consumo de energia.

A penetração da banda larga determina tanto o número total de potenciais assinantes e, em conjunto com o cenário demográfico e a estratégia de implementação de rede, como o número de assinantes localizados em determinada área. Uma vez que o número de potenciais assinantes é determinado, o operador pode seguir estratégias diferentes para a implementação da rede, essencialmente usando combinações diferentes de tecnologias de acordo com o número de utilizadores em diferentes áreas para atingir um objetivo global. Em geral, os custos de implementação por utilizador são inversamente proporcionais à densidade populacional, a estratégia mais racional para o operador seguir é a de iniciar a implementação nas áreas com densidades populacionais mais elevadas. Note-se que isto nem sempre é o caso, principalmente como consequência de diversos tipos de condições reguladoras.

Neste trabalho, no que toca ao *design* de rede, para o caso das PON, foi feito o cálculo do *link budget* para o dimensionamento de uma ODN de classe B+ (atenuação máxima permitida entre OLT e ONT de 28 dB), para que em algumas das análises seja possível comparar o comportamento energético das tecnologias de transmissão em cenário semelhantes.

Combinando adequadamente os *splitters* podem-se ter os 64 utilizadores por porto num *slot* OLT num raio de 20 km. Demasiada atenuação entre os extremos da rede poderá obrigar à utilização de um porto do OLT para 32 utilizadores ou até menos (o que obriga a outra combinação de *splitters*). A forma de fazer uma rede que defina a correta combinação e localização dos mesmos será denominada de topologia de rede, e existem 3 topologias

principais. Em todas as topologias, o primeiro andar de divisão do sinal pode ser aplicado na CO com um *splitter* 1:2, com vantagens e desvantagens:

- Desvantagem:
 - Dobra o número de fibras de saída da central;
- Vantagens:
 - Cria um primeiro ponto de flexibilidade na rede;
 - Otimiza a ocupação de portos da GPON;
 - Possibilidade de eliminar o primeiro andar de divisão (para melhoria de desempenho da rede) sem mexer na rede exterior;
 - Justificação do ponto anterior - aumento de alcance e/ou débito;
 - Clientes servidos diretamente a partir da central se distância em linha reta for inferior a 500 m;

A 3 topologias a aplicar são:

- Topologia Tipo A.
 - Esta é a topologia vista como ideal pelas operadoras e tem as seguintes características:
 - Primeiro andar de divisão (1:2) colocado na central, se o orçamento ótico o permitir.
 - Segundo andar de divisão (1:32, 1:4 ou 1:8) (será 1º andar se não tiver 1:2 no CO) colocado em armário de exterior com as ligações previamente feitas (SRO).
 - Os *splitters* de 1:32 cobrirão até 50% do total das UA's servidas pelo SRO.
 - Quando a procura (TR – *Take Rate*) for igual ou superior a 50% das UA's totais de algum edifício servido pelo SRO, será colocado um *splitter* no PDO que será de 1:4 se as UA's totais do edifício forem 27 ou 1:8 no caso contrário. Este *splitter* que será alimentado com outro *splitter* (colocado no SRO) complementar ao do PDO, para obter entre os dois uma divisão de 1:32, ou seja, para picos de procura (procura \geq 50% UA's) o andar de 1:32 será implementado com a combinação de *splitters* de 1:4 + 1:8 ou 1:8 + 1:4, estando

colocado o primeiro *splitter* desta combinação no SRO e o segundo no PDO.

- Será uma rede flexível:
- *Splitters*, portas GPON e MPLS com taxas de ocupação > 80%.
- Solução *pay as you grow*

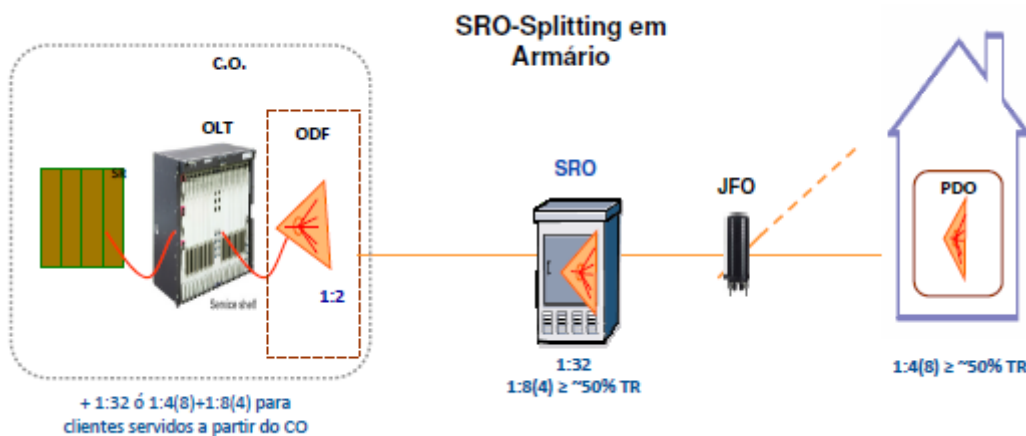


Figura 3.7. – Topologia Tipo A. (Fonte: PT, 2012)

- Topologia Tipo B.
 - Esta é a topologia vista como alternativa a Topologia A, quando a mesma não pode ser aplicada e apresenta as seguintes características:
 - Primeiro andar de divisão (1:2) colocado na central, se o orçamento ótico o permitir.
 - Segundo andar de *splitting* (1:32, 1:4 ou 1:8) colocado na junta de *splitters*.
 - Os *splitters* de 1:32 poderão cobrir até 50% do total das UA's servidas pela JSO.
 - Neste caso, podem ser analisados os edifícios que vão ser servidos com a JSO para, em função das UA's dos mesmos, determinar quantos *splitters* de 1:4 ou 1:8 devemos colocar na JSO. Estes *splitters* irão cobrir a procura igual ou superior a 50% das UA's totais dos edifícios servidos pela JSO. O critério de análise é o mesmo do caso anterior: Se as UA's de um edifício 27 => *splitter* a colocar no PDO do edifício = 1:4, caso contrário, colocaremos no

PDO um *splitter* de 1:8 (estes *splitters* serão alimentados do suplementar colocado na JSO)

- Pensada para fazer o *design* de zonas até 192 UA's, ou seja, cada junta com *splitter* (JSO) que coloquemos no andar de exterior deve cobrir uma área de 192 UA's.

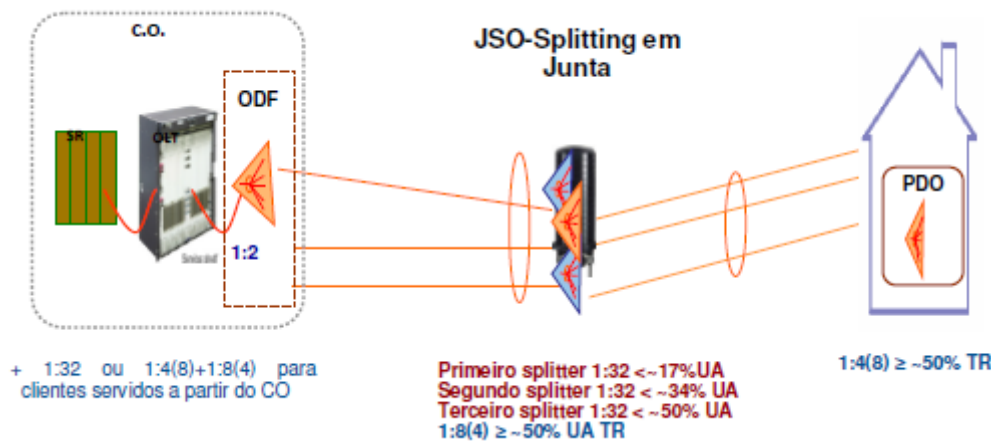


Figura 3.8. – Topologia Tipo B. (Fonte: PT, 2012)

- Topologia Tipo C.
 - Esta é a topologia que será utilizada quando tivermos que servir edifícios com um número de UA's igual ou superior a 64.
 - Primeiro andar de divisão (1:2) colocado na central, se o orçamento ótico o permitir.
 - Segundo andar de *splitting* (1:32) colocado no PDO (será o 1º andar se não existir 1:2 no CO).
 - Será instalado o primeiro *splitter* de 1:32 no primeiro dia. Será colocado o 2º *splitter* quando se for fazer a ligação de cliente para o assinante nº 33 desse edifício, será instalado o terceiro *splitter* quando se for fazer a ligação de cliente para o assinante 65 e assim sucessivamente.
 - Atingem-se 100% das UA's do edifício colocando vários *splitter* de 1:32 no PDO de acordo com a procura.
 - Trata-se de uma topologia que se pode dar em qualquer zona (zonas de topologia A, B ou zonas mistas).

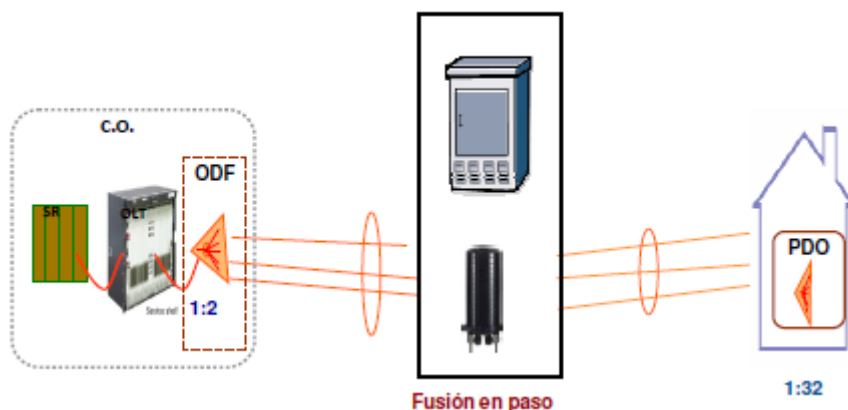


Figura 3.9. – Topologia Tipo C. (Fonte: PT, 2012)

O resumo sobre as 3 topologias típicas numa rede PON poderá ser consultado na Tabela 3.9.

Topologia	1º andar de splitting CO	2º andar de splitting SRO/JSO	3º andar de splitting PDO	Crítério
A	1:2	1:32	-	Para um nº de clientes até 50% do total de UA's do edifício.
	1:2	1:8	1:4	Para um nº de clientes entre 50% e 100% do total de UA's do edifício e nº de UA's=<27.
	1:2	1:4	1:8	Para um nº de clientes entre 50% e 100% do total de UA's do edifício e nº de UA's>27.
B	1:2	1:32	-	Para um nº de clientes até 50% do total de UA's do edifício.
	1:2	1:8	1:4	Para um nº de clientes entre 50% e 100% do total de UA's do edifício e nº de UA's=<27.
	1:2	1:4	1:8	Para um nº de clientes entre 50% e 100% do total de UA's do edifício e nº de UA's>27.
C	1:2	-	1:32	Para edifícios que tenham mais de 64 habitações e uma coluna montante/ponto de distribuição.

Tabela 3.9. – Resumo Topologias de Rede

Tendo em conta estes pressupostos, e para um dimensionamento típico, visto não existir uma área específica para a análise, adotou-se a topologia do Tipo A, para um ambiente

urbano denso, em que o número total de clientes é até 50% do número total de UA's do edifício, sendo assumido que as UAs encontram-se a mais de 500 metros da CO.

No CO serão colocados os equipamentos ativos (OLTs). Cada porto OLT será ligado a uma entrada de um *splitter* de 1:2 que porém estará ligado a um *splitter* 1:32 no SRO (no exterior) e o PDO (no edifício) não terá *splitters*. Adotou-se um regime de dois níveis de *splitting*, 1:2 em conjunto com 1:32, o que corresponde a uma combinação de exigência média, ao nível das tecnologias atuais, para um raio máximo de 20 km. A Figura 3.10. apresenta o esquema que traduz esta solução, cujo as legendas são as seguintes:

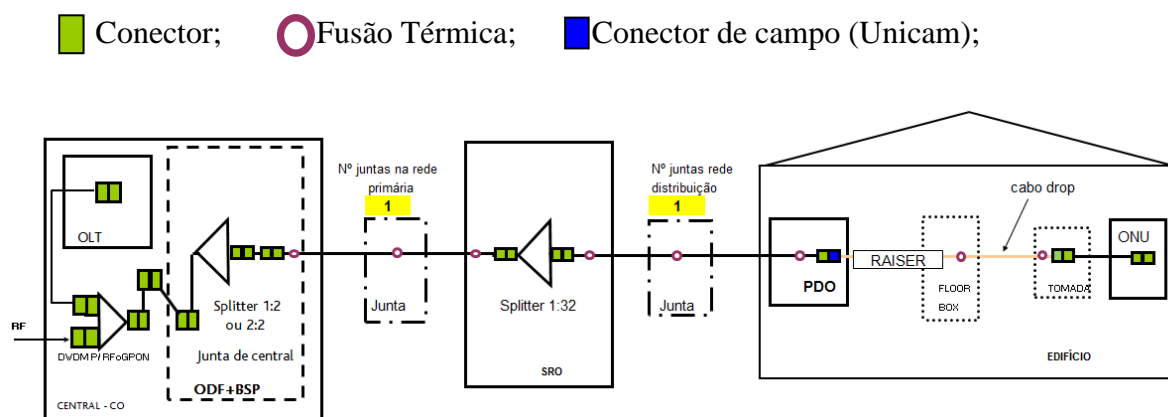


Figura 3.10. – Esquema de Rede Centralizada flexível. (Fonte: PT, 2012)

O cálculo de *link budget* comprova que esta combinação cumpre os requisitos para uma rede típica de categoria B+ (28 dB perdas máximas), que apresenta perdas máximas de 26,65 dB @ 1490 nm. A Tabela 3.10. apresenta o resumo do cálculo do *Link Budget* para uma rede de categoria B+ [25].

Link Budget rede ótica de categoria B+

<u><i>P_{OLT} downlink [dBm] @1490nm [1,5 - 5]</i></u>	3
<u><i>Splitter 1:2 no BSP [dB] (splitting na CO)</i></u>	3,7
<u><i>Splitter 1:32 no SRO [dB] (splitting na ODN)</i></u>	17,1
<u><i>Comprimento total FO [Km]</i></u>	20
<u><i>Atenuação FO [dB/Km] [0,21 – 0,24]</i></u>	0,24
<u><i>TOTAL Atenuação FO [dB]</i></u>	4,8
<u><i>Quantidade Fusões Térmicas</i></u>	8
<u><i>Atenuação Fusão Térmica [dB]</i></u>	0,05

<i>Atenuação TOTAL Fusões Térmicas [dB]</i>	0,4
<i>Quantidade Pares de Conectores [Uni]</i>	11
<i>Atenuação Par Conector [dB]</i>	0,3
<i>Atenuação TOTAL Conector SC-APC [dB]</i>	3,3
<i>Quantidade Par Conector de Campo [Uni]</i>	1
<i>Atenuação Par Conector de Campo [dB]</i>	0,35
<i>Atenuação TOTAL Conector de Campo [dB]</i>	0,35
<i><u>Atenuação TOTAL Fusões e Conectores [dB]</u></i>	4,05 (0,4 + 3,3 + 0,35)
<i>Pin_ONT [dBm] [1:2 BSP + SRO (1:32)]</i>	-26,65

Tabela 3.10. – Link Budget ODN de categoria B+.

Os números base de UAs para comparação, para todas as tecnologias em análise, para o cenário de rácio fixo 1:64, é de 16384 UAs, que é um segmento de área típico utilizado no processo de planificação da rede.

Capítulo

4

Avaliação do Consumo Energético

Até a data, não existe nenhum modelo padrão, reconhecido, para a avaliação do consumo energético de uma rede de acesso. Existem sim algumas propostas de autores que projetaram os seus modelos. Esses modelos possuem fatores que os seus autores entenderam serem necessários para os cálculos. Após extensiva pesquisa, foram selecionados dois modelos de cálculo para a análise comparativa das diferentes tecnologias óticas já apresentadas no Capítulo 2. A análise assenta-se na topologia de rede apresentada no Capítulo 3.

O processo de análise do consumo energético de uma rede de acesso iniciou com a seleção de tecnologias capazes de responder as exigências de desempenho do operador. A isto, juntou-se o *design* de rede (cenário de implementação), exigências e objetivos de QoS, que impactuam no dimensionamento da rede (número de equipamentos). A Figura 4.1. mostra a sequência aplicada nesta dissertação para se chegar ao consumo energético.



Figura 4.1. – Sequência para a avaliação do consumo energético.

Neste capítulo, as variáveis de consumo energético e os seus valores de referência são apresentados e discutidos. São descritos os modelos energéticos selecionados para análise e com base nos mesmos, o consumo energético de uma rede de acesso em estado estacionário é

avaliado. Pretende-se com os seguintes modelos, analisar comparativamente as tecnologias em causa, utilizando as características e os valores de consumo do OLT e ONT Cisco 4620.

Para ambos os modelos de cálculo (I e II) são seguidas duas abordagens comparativas: inicialmente considera-se um rácio de *splitting* fixo de proporção 1:64 numa ODN existente e de seguida considera-se uma ODN atualizada com um rácio de *splitting* otimizado para a largura de banda. O objetivo desta análise é descobrir os potenciais ganhos de eficiência energética que podem ser obtidos na rede acesso, ganhos esses que possibilitam um menor OPEX e menor emissão de CO₂, o que se traduz numa rede mais eficiente energeticamente.

4.1. Modelo de cálculo do consumo energético I

O modelo de cálculo I considera um cenário de implementação de rede numa grande metrópole para a avaliação da eficiência energética de diversas soluções de rede de acesso PON na perspectiva de um operador de telecomunicações [26]. O consumo de energia de uma rede de acesso ótica PON dá-se na no OLT e no ONT.

O OLT pode ser subdividido em três componentes. Na Figura 4.2. pode-se observar os componentes responsáveis pelo consumo energético na rede de acesso, de acordo com este modelo.

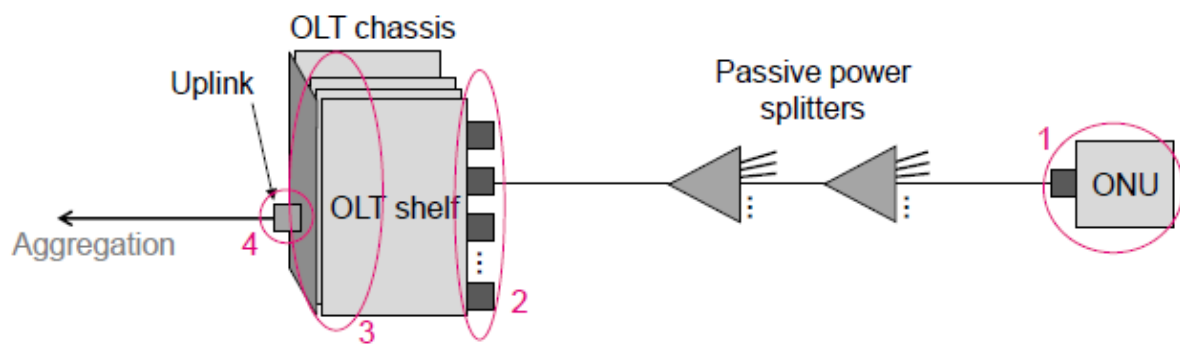


Figura 4.2. – Esquemático dos componentes responsáveis pelo consumo de energia.

4.1.1. Metodologia Modelo I

O consumo de energia da rede de acesso, segundo o modelo I, consiste na soma das seguintes contribuições:

- 1) Consumo do ONT

$$P_{ONT} = N_{ONT} \times P_{ONT} [W] \quad Eq.1$$

- 2) Consumo portos PON do OLT

$$P_{Portos\ OLT} = N_{Portos\ OLT} \times P_{Porto\ OLT} [W] \quad Eq.2$$

- 3) Consumo *Switch Layer 2* (processamento e gestão de tráfego)

$$P_{Switch\ L2} = N_{Chassis\ OLT} \times N_{Portos\ OLT/Chassi} \times LB_{DS+US} \times \left(\frac{W}{Gbps}\right) [W] \quad Eq.3$$

- 4) Consumo dos portos *Uplink*

$$P_{Portos\ Uplink} = N_{Chassis\ OLT} \times P_{Uplink} \quad Eq.4$$

- 5) Consumo total OLT

$$P_{OLT} = P_{Portos\ OLT} + P_{Switch\ L2} + P_{Portos\ Uplink} \quad Eq.5$$

A quantidade de equipamentos (número de portos, cartas e de chassis OLT) e capacidade de *uplink* necessários são calculados com base nos cenários (Cenários A, B e C) descritos na secção 3.3.

A potência total de consumo da implementação é então dividida pelo número de utilizadores ligados para obter o consumo de energia por utilizador. Note-se que mecanismos de poupança de energia como os modos de repouso não são considerados neste modelo. Como já mencionado anteriormente, apenas abordagens passivas de longo alcance são consideradas neste modelo, evitando o uso de elementos que atuam na rede de distribuição ótica (deste modelo excluem-se as AONs) [26].

A Tabela 4.1., que apresenta as tecnologias consideradas, pode-se observar que o consumo de energia por porta PON do OLT aumenta com o aumento da largura de banda da

PON. Como seria de esperar, tecnologias PON com maior capacidade de débito apresentam OLT com consumo mais elevado.

<i>Tecnologia</i>	<i>LB/PON DS/US (Total)</i> (Gb/s)	<i>PONs/chassis</i>	<i>Potência/porto</i> <i>OLT (W)</i>	<i>Potência</i> <i>ONT (W)</i>
GPON	2.5/1.25 (3.75)	256	5,6	3,2
EPON	1.25/1.25 (2.5)	256	5,5	3,2
XG-PON1	10/2.5 (12.5)	128	13,0	5,4
10G-EPON	10/10 (20)	128	14,0	6,2
NG-PON2	4x10/4x2.5 (50)	128	20,0	10,4

Tabela 4.1. – Tecnologias elegíveis para análise com o Modelo I.

Quando k utilizadores ativos, do total N utilizadores independentes, estão exigir ou entregar tráfego de/para uma interface do OLT, a largura de banda máxima que pode ser oferecida para cada utilizador é dada por:

$$B_{max} = \frac{LB_{PON}}{k}, 1 \leq k \leq N \quad Eq.6$$

Quando B_{max} é maior do que o débito pretendido, B_{target} , todos os utilizadores ativos obtêm o B_{target} solicitado. No entanto, quando há também muitos utilizadores ativos, B_{max} pode ser menor do que B_{target} , e os utilizadores ativos só poderão obter B_{max} . O número máximo de utilizadores ativos para um determinado B_{target} é dado por

$$k_{max} = \left\lfloor \frac{LB_{PON}}{B_{target}} \right\rfloor \quad Eq.7$$

4.1.2. Resultados Modelo I

Para a obtenção dos resultados foram aplicadas duas abordagens diferentes. Na primeira, o desempenho das soluções é analisado sem modificações na ODN, considerando um rácio de *splitting* fixo de 1:64 (64 utilizadores por PON) para todas as tecnologias. (Um cálculo do *link budget* foi realizado para se verificar as perdas máximas para uma rede de classe B+ com um rácio de 1:64.).

Na segunda abordagem, foi determinado o rácio de *splitting* máximo para o qual um débito mínimo pode ser garantido para cada tecnologia. De notar que este rácio de *splitting* poderá ser maior ou menor do que o de 1:64, dependendo do débito mínimo pretendido e da tecnologia PON. Decidiu-se limitar o rácio mínimo a 1:8 e o máximo a 1:256, visto que são considerados valores extremos atualmente.

4.1.2.1. Rácio de divisão fixo 1:64

▪ Largura de banda máxima por utilizador

Nesta primeira análise, pretende-se demonstrar a largura de banda máxima por utilizador, que se pode obter quando se utiliza o rácio de 1:64 (que até recentemente era o rácio mais utilizado a nível nacional em GPON – muito recentemente, em GPON, passou-se a utilizar um rácio de 1:32) para as diversas tecnologias em estudo. Este é o débito real bruto para situações em que todos os utilizadores da PON, em simultâneo, requerem a largura de banda máxima que podem obter.

Na Figura 4.3., podemos constatar que as tecnologias mais recentes como o NG PON2 e o XG PON1 e o 10G EPON apresentam um desempenho, em termos de capacidade, significativamente superior as tecnologias legadas GPON e EPON.

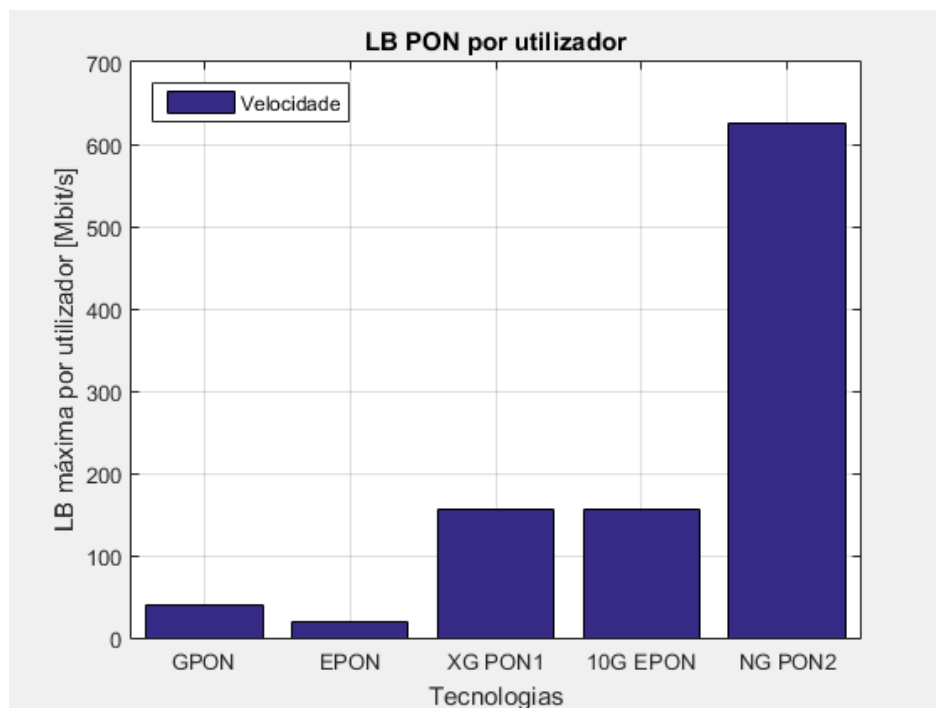


Figura 4.3. – Largura de banda por utilizador, em rácio 1:64.

Para o mesmo rácio, uma PON de tecnologia NG-PON2 é, de longe, superior as restantes tecnologias no que toca a largura de banda disponível para cada utilizador, apresentando valores de débito por utilizador próximos dos 600 Mbps, enquanto que o XG PON1 e o 10G EPON ficam-se pelos 150 Mbps e o GPON nos 30 Mbps.

O GPON, que é a tecnologia mais implementada a nível nacional, e o EPON apresentam valores no limite do aceitável para as exigências atuais, ou seja, cerca de 30 Mbps por utilizador. Curioso é que apesar deste valor de 30Mbps por utilizador oferecido pela tecnologia GPON, os clientes residenciais em Portugal têm atualmente ofertas de pacotes de serviços com débitos de 30, 100, 200 e 400 Mbps. A justificação para esse facto é o mecanismo de DBA e também a progressiva migração do GPON para NG PON2.

A Figura 4.4. apresenta o comportamento da largura de banda da PON com o aumento de utilizadores. Como se pode observar as tecnologias legadas não têm capacidade para suportar um grande número de utilizadores pois o débito fica bastante comprometido para situações em que existem muitos utilizadores na PON.

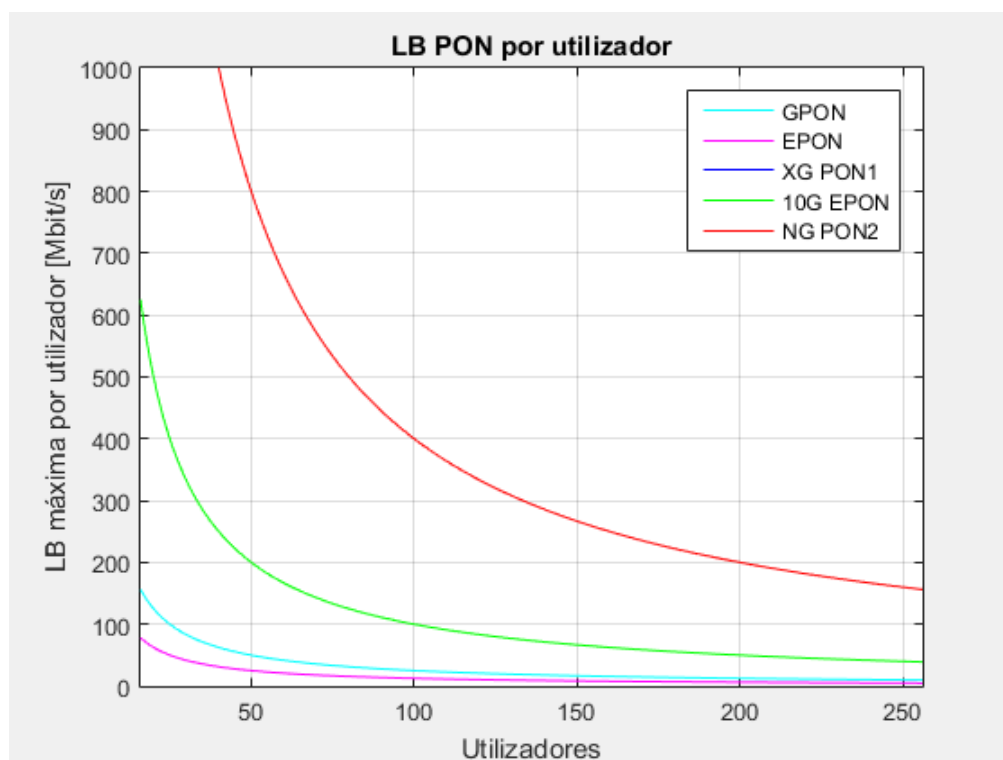


Figura 4.4. – Comportamento da largura de banda com o aumento de utilizadores na PON, em rácio 1:64.

▪ Consumo energético por utilizador

Na Figura 4.5. temos os resultados do consumo dos OLT, no CO, das diferentes tecnologias PON.

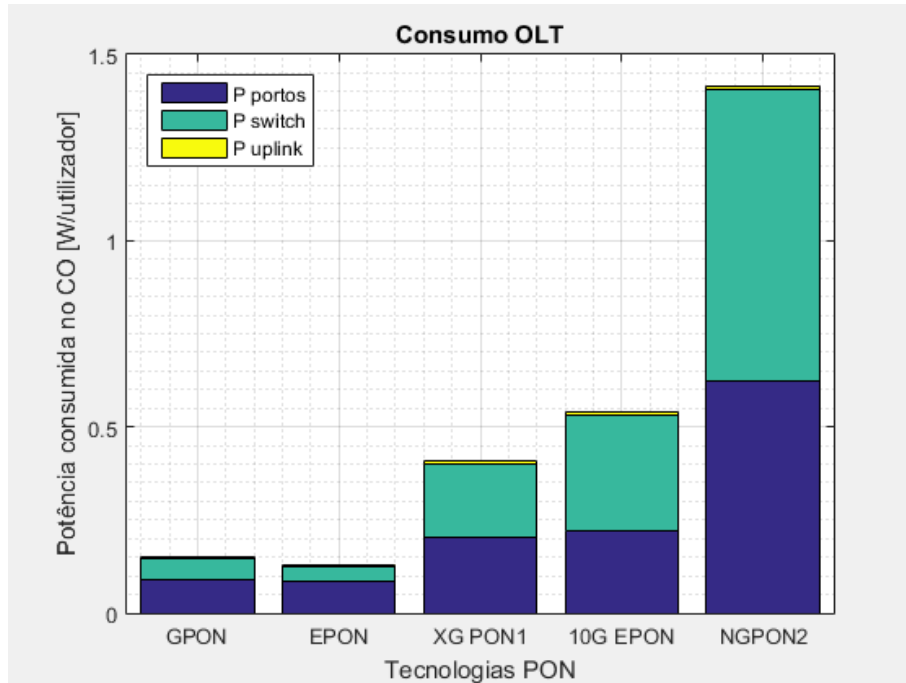


Figura 4.5. – Consumo dos três componentes principais do OLT, em rácio 1:64.

Nesta análise, em que o rácio de divisão é igual entre as tecnologias (1:64), conclui-se que a solução com OLT da tecnologia NG PON2 é a que apresenta o maior consumo energético total por utilizador, de cerca de 1,42 W. De seguida vem o 10G-EPON com um consumo por utilizador de 0,54 W e o XG-PON1 apresenta um consumo de 0,41 W por utilizador. As tecnologias GPON e EPON apresentam os consumos mais baixos por utilizador, com 0,15W e 0,13W respetivamente.

As diferenças de consumo justificam-se com as diferenças nos três grandes componentes do OLT: os portos PON, o *switching* e o *uplink*. Enquanto que em cada PON da tecnologia NG-PON2 tem-se a presença de 4 λ de 10 Gbps, numa PON de GPON tem-se apenas 1 λ de 2,5 Gbps. Essa diferença é a grande responsável pela disparidade de consumos entre estas duas tecnologias. Maior transmissão de dados obriga a que sejam necessários componentes mais complexos e com superior capacidade de processamento, o que consequentemente provoca maior consumo de energia.

Na Tabela 4.2. podemos ver os consumos das diferentes partes dos OLT das tecnologias em análise.

<i>Tecnologia</i>	<i>P porto PON (W)</i>	<i>P switching (W)</i>	<i>P uplink (W)</i>	<i>P total OLT (W)</i>
GPON	0,0875	0,0586	0,0049	0,151
EPON	0,0859	0,0391	0,0049	0,1299
XG-PON1	0,2031	0,1953	0,0098	0,4082
10G-EPON	0,2188	0,3125	0,0098	0,5410
NG-PON2	0,6250	0,7813	0,0098	1,4160

Tabela 4.2. – Consumo OLT Modelo I.

Podemos ver que os *transceivers* e o *switching* de dados são os grandes responsáveis pelo consumo. No entanto uma curiosidade é que em NG PON2 o *switching* de dados tem maior impacto no consumo que o *transceiver*.

4.1.2.2. Rácio de divisão otimizado

Mediante as diferenças nas tecnologias, faz todo o sentido fazer-se uma análise em que o rácio é adaptado a capacidade de cada uma, só assim se pode ter a verdadeira noção das vantagens e desvantagens que cada tecnologia possui. Numa primeira análise define-se o débito pretendido e de seguida com a capacidade máxima da tecnologia, consegue-se saber quantos cliente podem ser servidos a esse débito numa PON. Com o número de clientes conseguimos definir o rácio correspondente.

▪ Consumo energético por utilizador, com o rácio otimizado para 300Mbps

Neste caso temos rácio de 1:8, 1:8, 1:32, 1:32 e 1:128 respetivamente. Para se poder garantir os 300 Mbps para todos os utilizadores numa PON de tecnologia GPON apenas podemos ter um máximo de 8 utilizadores na PON em simultâneo. Já as tecnologias XG-PON e 10G-PON podem garantir este débito a um máximo de 32 utilizadores e o NG-PON2 por sua vez consegue garantir os 300 Mbps a um máximo de 128 utilizadores em simultâneo. A Figura 4.6 apresenta a largura de banda máxima disponível a cada utilizador quando os rácios mencionados anteriormente mencionados são aplicados.

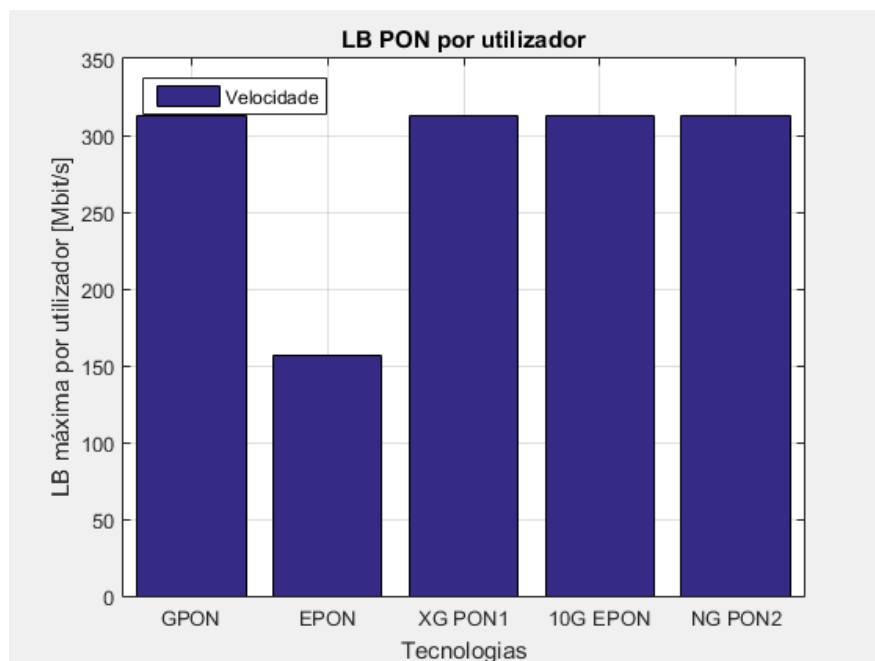


Figura 4.6. - Largura de banda por utilizador, em rácio otimizado.

Podemos comprovar que o EPON, é o mais limitado das tecnologias em análise, pois nem com este rácio mínimo de 1:8 consegue garantir os 300 Mbps a todos os utilizadores (o que justifica também a sua fraca popularidade em comparação com o GPON). Na Figura 4.7. podemos observar o consumo dos OLT nos respetivos rácios de 1:8, 1:8, 1:32, 1:32 e 1:128.

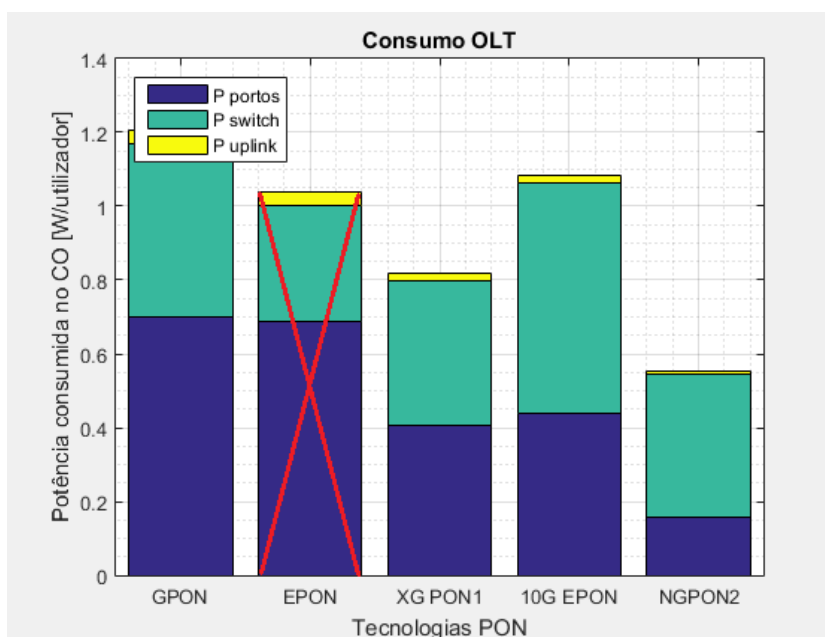


Figura 4.7. - Consumo dos principais componentes do OLT, em rácio otimizado.

O EPON não consegue cumprir os requisitos de débito portanto os seus resultados não são comparáveis com as restantes tecnologias. Podemos concluir que a um débito de 300 Mbps por cliente, o NG-PON2 é a tecnologia que apresenta o melhor desempenho, tendo um consumo de 0,5 W por utilizador. Logo de seguida encontram-se o XG-PON1 com 0,8 W por utilizador e o 10G-EPON com consumos na ordem dos 1,1 W por utilizador. Nesta análise, o muito popular GPON perfila-se como o menos eficiente, com o consumo a atingir os 1,2 W por utilizador.

▪ **Consumo energético por utilizador, com o rácio otimizado para 150Mbps**

Aumentando o rácio, aumenta-se o número de utilizadores por PON, e consequentemente reduz-se o débito máximo por utilizador. Neste caso temos rácios de 1:16, 1:8, 1:64, 1:64 e 1:256 respetivamente. Na Figura 4.9 podemos observar que o EPON é na realidade ainda mais ineficiente que o GPON, o que o torna a longo prazo num mau investimento. O GPON apresenta melhores resultados mas mesmo assim é ultrapassado pelas tecnologias mais recentes.

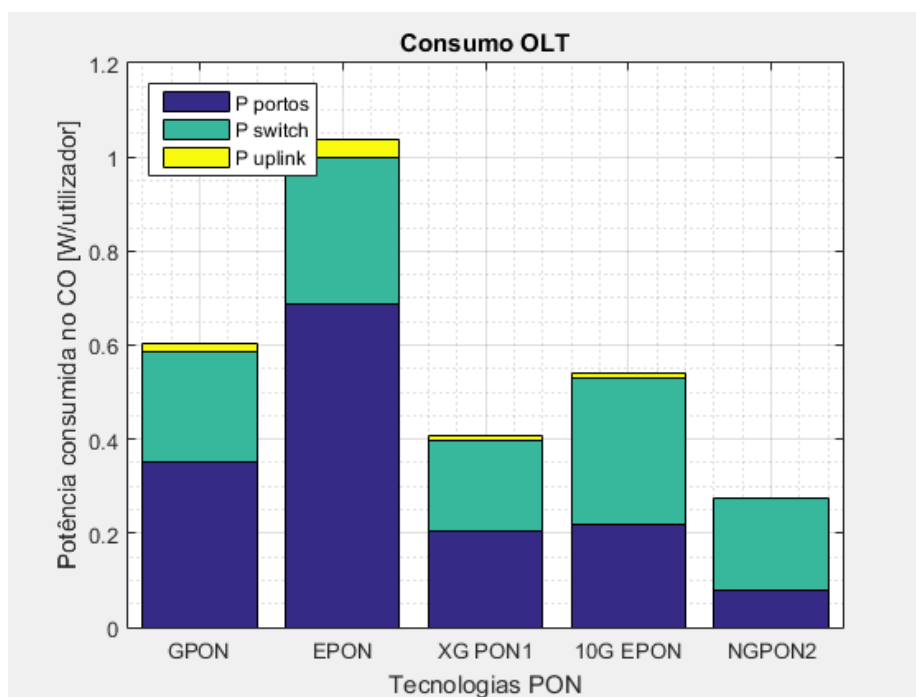


Figura 4.9. - Consumo dos três componentes principais do OLT, em rácio otimizado.

Mais uma vez confirma-se que, segundo este modelo o NG-PON2 é uma tecnologia que vem revolucionar a eficiência das redes óticas apresentando valores recorde tanto de débito como de eficiência.

▪ **Consumo energético por utilizador, com o rácio otimizado para 80Mbps**

Neste caso temos rácio de 1:32, 1:16, 1:128, 1:128 e 1:512 respetivamente. Este rácio de 1:32 em GPON tem sido adotado ultimamente (ao invés dos 1:64) perante a subida nas ofertas de débito para os utilizadores dos serviços *tripleplay* de televisão, internet e telefone. Aos clientes é oferecido 100 Mbps ou 200 Mbps, que são atingíveis mediante o uso do DBA. Na realidade, se todos os utilizadores estiverem *online* em simultâneo e tentarem utilizar toda a largura de banda a que têm direito, não conseguirão obter mais de 80 Mbps.

Na Figura 4.10. podemos ver os consumos obtidos nesta situação.

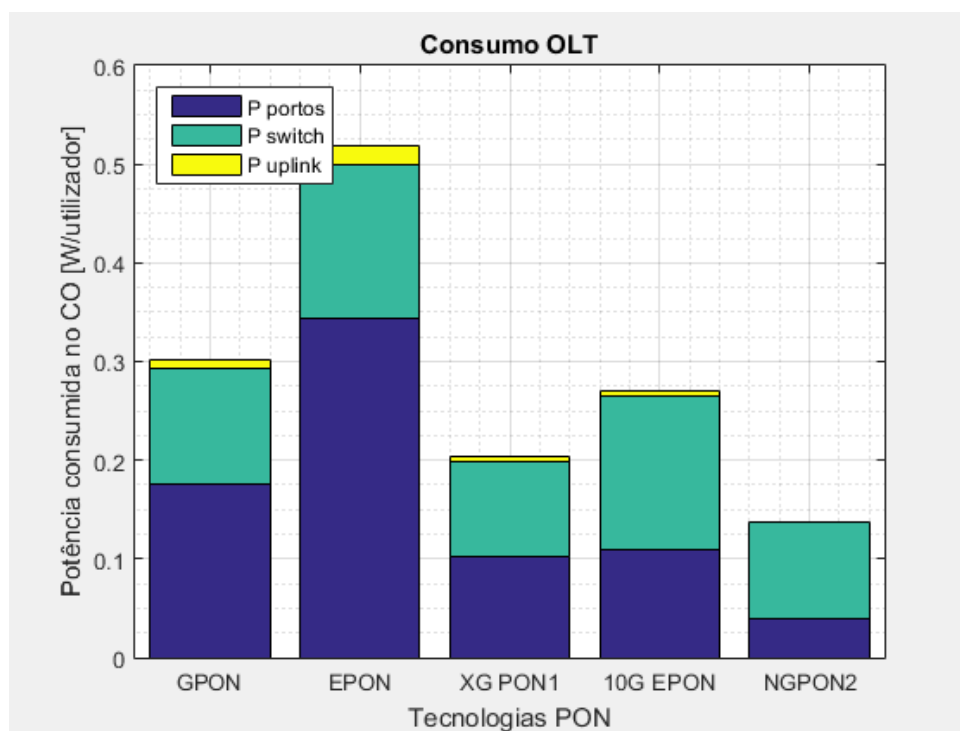


Figura 4.10. - Consumo dos três componentes principais do OLT, em rácio otimizado.

A Figura 4.11. apresenta o consumo total incluindo o ONT, para os rácios descritos nesta última análise.

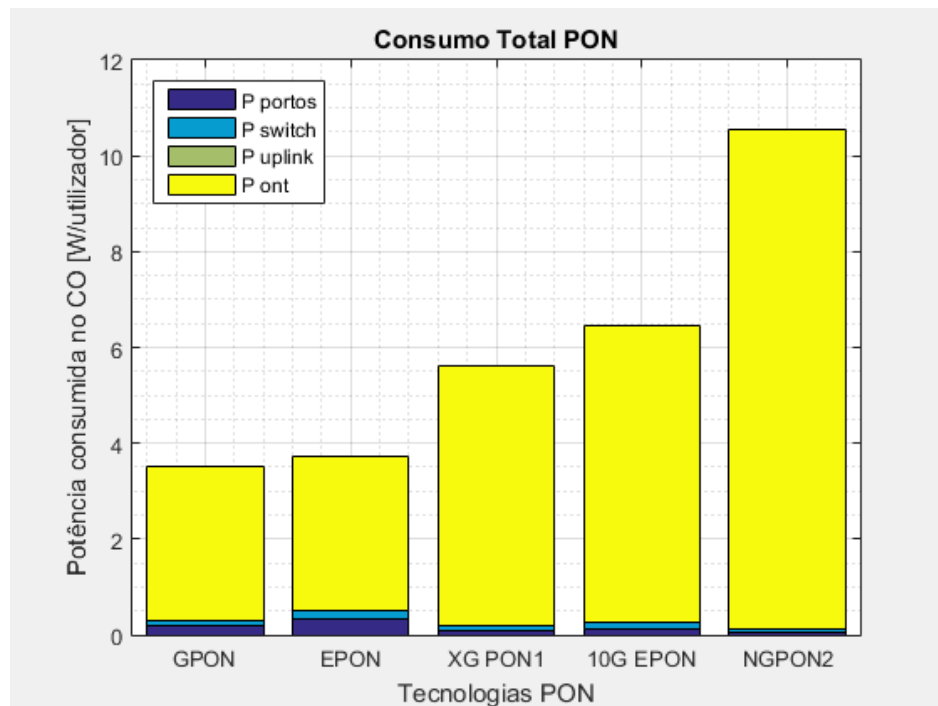


Figura 4.11. - Consumo do OLT e do ONT, em rácio otimizado.

O consumo energético do ONT é da responsabilidade do cliente, no entanto não se pode ignorar. Podemos concluir que existe uma relação não linear entre a capacidade de do ONT e o seu consumo, na medida em que um ONT de GPON consome 1/3 da energia consumida por um ONT de NG-PON2, mas as comparações ficam-se por aí porque a capacidade do NG-PON2 é muito superior o que o torna realmente na tecnologia a apostar pois consegue servir um maior número de clientes por PON e garantir ainda assim um débito aceitável, mesmo com um rácio de 1:512.

Mediante estes resultados, não se pode afirmar que determinado rácio é o ideal, cabe ao operador decidir qual o que se adequa melhor as suas necessidades. O NG-PON2 é a tecnologia que garante maior longevidade, tendo uma margem de ajuste da ODN superior, pois pode-se ir baixando o rácio progressivamente a medida que for necessário incrementar o débito por utilizador sem impactuar de forma significativa o consumo energético. XG-PON1 também é uma solução interessante, aproximando-se do NG-PON2 em eficiência mas não possui a longevidade que o NG-PON2 apresenta.

Existe um *trade-off* entre o débito e consumo de energia: o aumento do rácio de *splitting* vai diminuir o débito, mas que também irá diminuir o consumo energético uma vez que o mesmo OLT é partilhado por mais utilizadores em simultâneo. A diminuição do rácio

de *splitting* vai aumentar o débito mas analogamente vai aumentar o consumo pois existem menos utilizadores a partilharem o mesmo OLT.

4.2. Modelo de cálculo do consumo energético II

Este modelo de cálculo de consumo energético de uma rede de acesso, tal como o anterior, apresenta um processo de cálculo que procura comparar as diferentes opções existentes para as redes óticas FTTH [27] [28]. Atendendo a diversidade de opções tecnológicas para a rede de acesso, uma clara vantagem deste modelo para o anterior é a possibilidade de comparação de redes PON e também de redes AON, algo que não é possível com modelo anterior.

As variantes de redes acesso FTTH em análise são mostradas na Figura 4.12. Numa rede *P2P Ethernet*, cada ONT encontra-se ligada a CO através de uma fibra individual que termina num *Switch* que caracteriza o CN (*Central Node*). Numa rede AON os ONTs encontram-se ligados a um *Switch Ethernet* que caracteriza o RN (*Remote Node*) pois este costuma a estar localizado num armário de rua ou num edifício, porém, este RN está por sua vez ligado a um *Switch* CN. Em redes óticas passivas do tipo PON, um conjunto de ONTs estão ligados a um porto OLT que se localiza num CO.

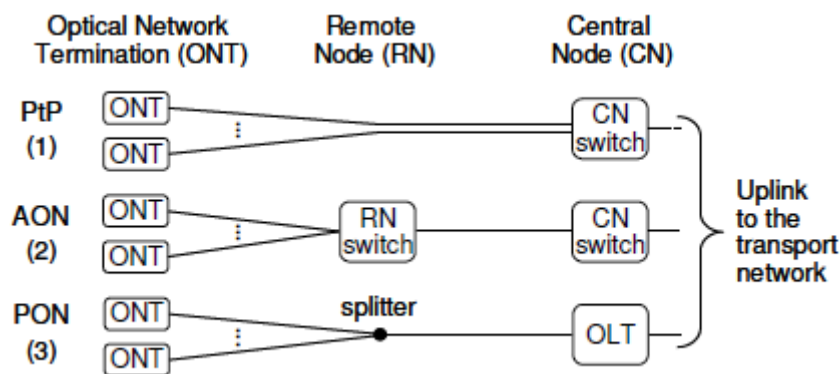


Figura 4.12. - Visão esquemática das variantes das redes de acesso FTTH.

4.2.1. Metodologia Modelo II

Neste modelo, aplicável em áreas urbanas densas com N utilizadores, o consumo de energia por utilizador na rede de acesso é calculado, independentemente da tecnologia em uso.

Para uma área de serviço com N utilizadores tem-se:

$$P_v = N \times \left(P_{ONTv} + \frac{\alpha P_{CN}}{N_{CN}} + \frac{\alpha P_{RN}}{N_{RN}} \right), A \leq A_{MAX} \quad Eq.8$$

Em que:

- P_v : Potência consumida por área de serviço
- P_{ONT} : Potência consumida pelo equipamento no cliente (ONT/ONU)
- P_{RN} : Potência consumida pelo *Remote Node*
- P_{CN} : Potência consumida pelo *Central Node*, equipamento na CO (OLT/SWITCH)
- N: Número de utilizadores na área de serviço
- N_{RN} : Número de utilizadores que partilham um RN
- N_{CN} : Número de utilizadores que partilham um CN
- A: Débito médio do acesso em Mbps
- A_{MAX} : Débito máximo atingido pela tecnologia
- α : Fator perdas e arrefecimento
- a: Taxa de agregação de bits

A anterior equação acrescenta-se um fator $\alpha = 2$, um fator de consumo de energia no RN e no CN corresponde a requisitos de arrefecimento e perdas da fonte de alimentação externa. RN e CN fornecem uma capacidade de taxa de bits total de R_{RN} e R_{CN} , prospectivamente. Além disso, é assumida uma taxa de bits total agregada de a:1 na secção de rede de acesso.

Portanto a Equação 9 pode ser rescrita da seguinte forma:

$$P_v = N \times \left(P_{ONTv} + \frac{2P_{CN}}{N_{CN}} + \frac{2P_{RN}}{N_{RN}} \right), A \leq A_{MAX} \quad Eq.9$$

No caso do P2P ($v=1$), o RN não existe ($P_{RN}=0$) e o *switch* no CO tem R_{CN1}/r_p portos com o débito máximo por porto de r_p . Se o *switch* agrega um débito total de $r \times N_{CN1}$ que provém de N_{CN1} assinantes por cada *switch* CN por um fator de agregação a , o débito de *uplink*

será $r \times N_{CN1}/a$. Relacionando, o débito de *uplink* pode também ser escrito como $r_p \times (R_{CN1}/r_p - N_{CN1})$, como resultado tem-se:

$$N_{CN1} = \frac{a \times R_{CN1}}{r + a \times r_p} \quad Eq.10$$

utilizadores que partilham um único *switch* CN. Então a potência de consumo em redes P2P é obtida através de:

$$P_1 = N \times \left(P_{ONT1} + 2 \times \left(\frac{r + a \times r_p}{a \times R_{CN1}} \right) \times P_{CN1} \right) \quad Eq.11$$

No caso da AON ($v=2$), existem ambos os *Switch*, CN e RN. Na Eq.10 tem-se:

$$N_{RN2} = \frac{a \times R_{RN2}}{r + a \times r_p} \quad Eq.12$$

assinantes que partilham um único *switch* RN. Mantendo a anterior suposição, metade da capacidade de débito do *switch* CN ($R_{CN2}/2$) é utilizada no *link* em direcção aos RNs e a outra metade no *uplink*, em direcção a rede. No *switch* CN, o débito binário que chega proveniente do RN é r/a por assinante e

$$N_{CN2} = \frac{R_{CN2}}{2} \times \frac{a}{r} \quad Eq.13$$

assinantes partilham um *switch* CN. Então o consumo de potência numa AON é obtido através de

$$P_2 = N \times \left(P_{ONT2} + 2 \times \left(\frac{r + a \times r_p}{a \times R_{RN2}} \right) \times P_{RN2} + 2 \times \left(\frac{2r}{a \times R_{CN2}} \right) \times P_{CN2} \right) \quad Eq.14$$

Quanto ao caso das PON ($v=3$), o RN é um *splitter* passivo ($P_{RN} = 0$) e o CN um OLT. O débito médio $r \times N_{CN3}$ dos N_{CN3} assinantes por *shelf* OLT é traduzido no débito de *uplink* $r \times R_{CN3}/a$. Relativamente ao débito R_{CN3} do OLT, o débito do *uplink* também pode ser escrito como $R_{CN3} - r \times N_{CN3}$, o que resulta em

$$N_{CN3} = \frac{a \times R_{CN2}}{r \times (1+a)} \quad Eq.15$$

assinantes que partilham uma *shelf* OLT. O consumo energético de um sistema PON resultante é dado por

$$P_3 = N \times \left(P_{ONT3} + 2 \times \left(\frac{(1+a) \times r}{a \times R_{CN3}} \right) \times P_{CN3} \right) \quad Eq.16$$

A Tabela 4.3., que apresenta as tecnologias consideradas neste modelo.

<i>Tecnologia</i>	<i>LB/PON DS/US (Total) (Gb/s)</i>	<i>PONs/chassis</i>	<i>Potência/porto OLT (W)</i>	<i>Potência/porto ONT (W)</i>
GPON	2.5/1.25 (3.75)	256	5,6	3,2
EPON	1.25/1.25 (2.5)	256	5,5	3,2
XG-PON1	10/2.5 (12.5)	128	13,0	5,4
10G-EPON	10/10 (20)	128	14,0	6,2
NG-PON2	4x10/4x2.5 (50)	128	20,0	10,4
P2P	1/1	-	2.8	3.0
Active Ethernet 1G				

Tabela 4.3. – Tecnologias elegíveis para análise com o Modelo II.

4.2.2. Resultados Modelo II

Neste modelo II a análise prende-se pela comparação da evolução do consumo com o aumento do débito. Tal como o que foi feito para o modelo I o desempenho das soluções é analisado sem modificações na ODN, considerando um rácio de *splitting* fixo de 1:64.

4.2.2.1. Rácio de divisão fixo 1:64 (16384 utilizadores)

Este modelo II é coerente quando o n.º de utilizadores é o mesmo para as tecnologias em comparação, não permitindo comparações com rácios diferentes. Da Tabela 4.4. obtém-se:

<i>Tecnologia</i>	<i>P OLT Utilizador (W)</i>	<i>P OLT Utilizador (W)</i>	<i>P OLT 16384 Utilizadores (W)</i>	<i>R OLT 16384 Utilizadores (Gbps)</i>
GPON	0,151	0,151	2474	256x2.5 = 640
EPON	0,1299	0,1299	2128	256x1.3 = 340
XG-PON1	0,4082	0,4082	6688	2560
10G-EPON	0,5410	0,5410	8864	2560
NG-PON2	1,4160	1,4160	23200	10240

Tabela 4.4. – Potência OLT e Débito OLT para 16384 utilizadores.

Podemos ver que para uma área de cerca de 16 mil utilizadores o NG-PON2 apresenta um consumo total de 23200 W.

Aplicando o modelo, obtemos a evolução do consumo energético. Na Figura 4.13. temos o desempenho das tecnologias P2P e AON.

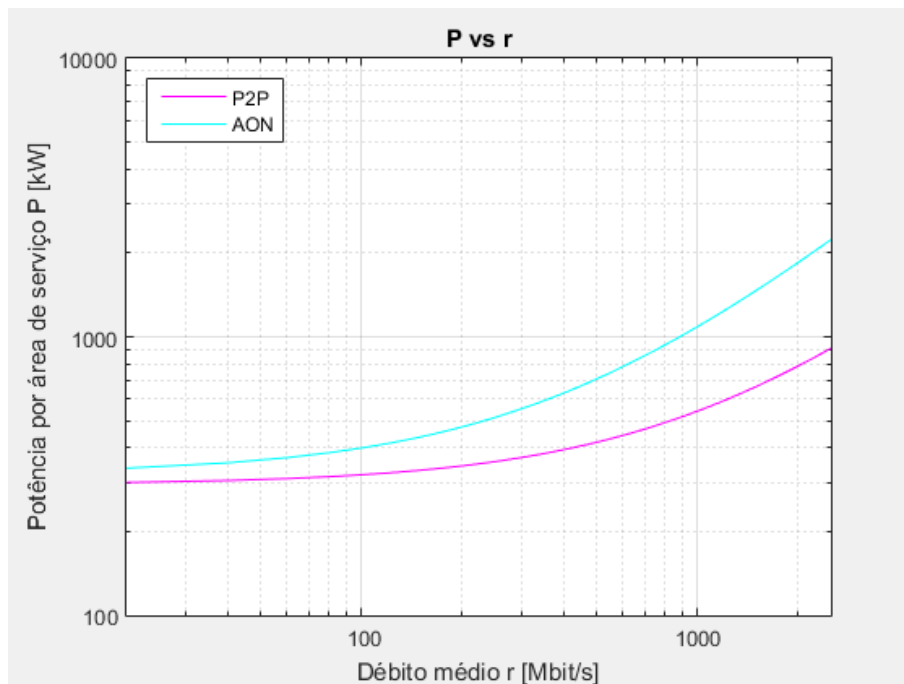


Figura 4.13. – P2P e AON para área de 16384 utilizadores.

Apesar da semelhança entre o P2P e o AON, conclui-se que o P2P é uma solução mais eficiente que o AON, indistintamente do débito que estiver a ser oferecido ao cliente. Isto é compreensível pois a presença do nó remoto na tecnologia AON acrescenta um ponto de consumo energético que não existe em P2P (nem em tecnologias PON). Esse nó remoto tem uma vantagem interessante e única entre as tecnologias em comparação, possibilita a extensão da rede para distâncias mais longas que qualquer outra tecnologia (até 80 km) recorrendo a técnicas de regeneração do sinal. (O nó remoto AON possibilita também gestão do tráfego mas esta não se trata de uma vantagem significativa).

Na Figura 4.14. podemos ver o comportamento das tecnologias PON para a área em análise.

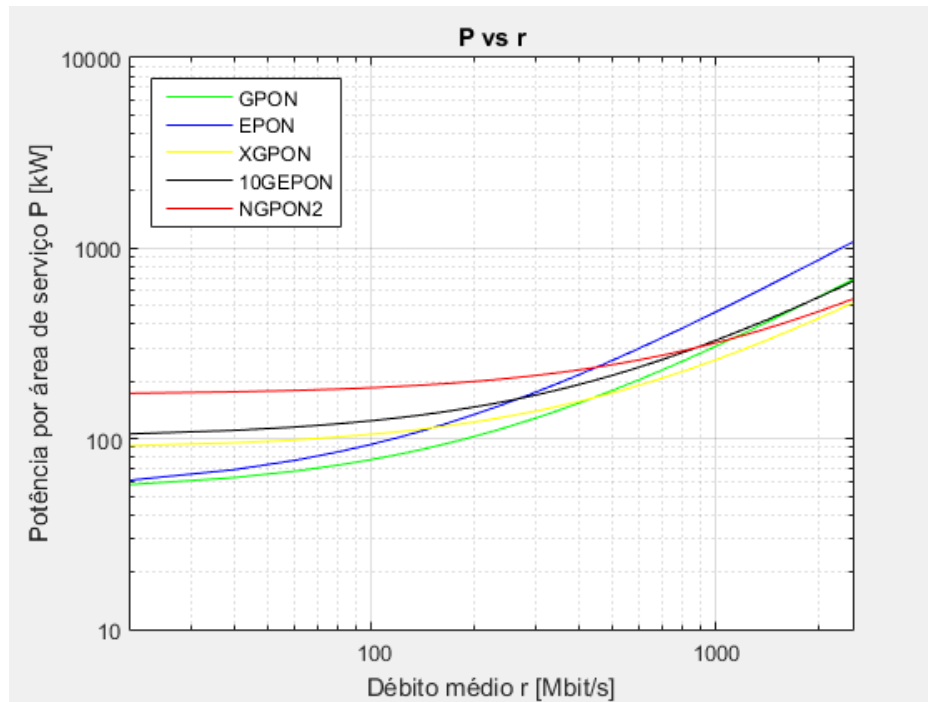


Figura 4.14. – PON para área de 16384 utilizadores.

Com o rácio fixo de 1:64 para todas as tecnologias, para débitos de até 100 Mbps, o GPON e o EPON são as tecnologias que apresentam o melhor desempenho energético. A partir dos 300 Mbps o XG-PON1 é a tecnologia dominante mas para débitos na ordem do Gigabit o NG-PON2 apresenta o melhor desempenho e a medida que se aumenta o débito, a eficiência do NG-PON2 superioriza-se ao XG-PON1. Podemos afirmar que estas duas tecnologias perfilam-se como sendo melhores opções que as restantes.

Na Figura 4.15. podemos observar que quase todas as tecnologias PON são mais eficientes energeticamente que as AON. Isto deve-se ao facto de que o consumo energético nas PON é partilhado entre vários utilizadores, o que o reduz significativamente. O P2P é uma opção interessante mas não é superior as opções PON.

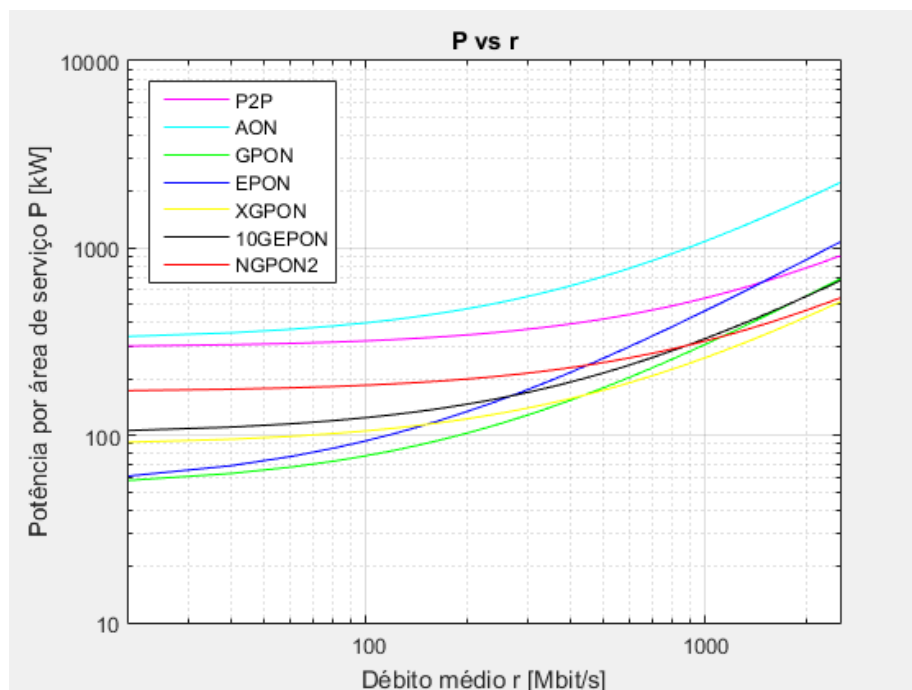


Figura 4.15. – AON, P2P e PON para área de 16384 utilizadores.

De um modo geral, os valores de consumo de energia entre as tecnologias mais recentes como o 10G-EPON, o XG-PON1 e NG-PON2 estão próximos uns dos outros; mas a última apresenta o melhor desempenho. No entanto, o consumo de energia no ONT pode ser um fator de diferenciação, com o NG-PON2 a exigir mais energia do que as restantes. O ONT NG-PON2 consome ligeiramente mais do que o XG-PON, devido ao processo de ajuste do laser e do filtro de receção.

Analizou-se a eficiência energética de várias tecnologias óticas de acesso, AON, P2P e PON para serviços de internet alta velocidade, considerando um cenário de implantação numa grande cidade. Em certa medida, aumentando as exigências até 300 Mbps, as mesmas podem ser satisfeitas sem alterações na ODN atualmente implantada, com uma taxa de divisão de 1:64, usando XG-PON, que consome menos energia que a tecnologia NG-PON2. Para futuras exigências dos utilizadores até 1 Gbps, é mais interessante o uso do NG-PON2, que possui rácios de divisão mais elevados e maior alcance e que oferecem a possibilidade de consolidação de CO (simplificando a gestão, manutenção e reduzindo o OPEX), além de uma maior eficiência energética.

Entre os diferentes candidatos o NG-PON2 foi o que apresentou os melhores resultados. A implementação de estratégias de poupança de energia, como os modos de repouso ainda pode mudar as proporções relativas entre as soluções analisadas.

Capítulo

5

Conclusão e Trabalho Futuro

5.1. Conclusão

Considerações energéticas têm desempenhado um papel muito limitado no planeamento, gestão e regulação das redes de nova geração. Este é um cenário que parece incompreensível, na medida em que as redes de banda larga são o centro de qualquer política ou estratégia para fomentar o desenvolvimento económico e a criação de redes de ultra-alta-velocidade é visto como a base para a realização da influente mudança social e económica relacionada com as TIC. Se o que se pretende no futuro é a sustentabilidade então as redes de nova geração devem ter um papel a desempenhar nesse futuro, logo o consumo de energia das NGN - e os custos associados - não devem ser negligenciados. No caso dos operadores, os custos de consumo de energia tem um impacto direto sobre as suas despesas operacionais, mas estratégias de promoção da inovação sustentável poderia tornar-se um critério de importação para as partes interessadas para além do mero plano de negócio. Além disso, os cidadãos estão cada vez mais conscientes do seu papel na construção da sociedade, tentando adicionar a sua contribuição para torná-lo mais sustentável. Para muitos, os aspetos de economia de energia tornam-se num fator a ser considerado nas decisões de aquisição de alguns produtos e serviços. Embora este comportamento ainda não tenha sido demonstrado a estender as telecomunicações, vale a pena explorá-lo, nem que seja apenas para aumentar a conscientização do utilizador da relevância da energia no domínio redes ultra banda larga.

Paradoxalmente na sociedade da informação atual, em geral, os consumidores e até mesmo decisores políticos, apresentam falta de informação específica e, portanto, sabem pouco sobre o impacto energético do aumento do uso de redes de telecomunicações. Assim, a estes grupos está em falta informação crítica com a qual possam tomar decisões.

A informação é um fator recorrente nestas análises. Por exemplo, uma enorme campanha europeia fez com que os consumidores fossem informados sobre a eficiência energética, sustentabilidade e custos associados de vários tipos de iluminação caseira, esse fator aumentou consideravelmente a preferência dos consumidores para a adoção de lâmpadas muito mais caras, em led, fazendo com que a iluminação sustentável passasse a ser a escolha primordial. Embora que as questões ambientais estejam longe de ser questões de ponta na área de telecomunicações, estratégias para o mercado “verdes” podem, contudo, ser produtivas. Portanto, a ausência de informações entra em conflito com a ascensão de uma nova classe de consumidores com conhecimentos e que estão a fazer escolhas conscientes.

Na promoção da discussão sobre a eficiência energética nas redes de acesso, esta pesquisa apresenta uma análise sobre dois interessantes modelos para a avaliação da energia consumida por uma rede de acesso em um ambiente prático. A base para a avaliação do consumo foi construída através da combinação de uma série de parâmetros. A análise e seleção de tecnologias atuais e futuras, projeto de um cenário realista de implementação, recolha de informação sobre consumos energéticos dos dispositivos, aplicação dos modelos.

Assim, um dos principais resultados da pesquisa é que os diferentes métodos devem ser analisados para a obtenção de resultados mais fidedignos, de modo a se convergir a determinada conclusão. Outra conclusão interessante foi que as novas tecnologias PON apresentam consumos inferiores às legadas devido ao facto de serem capazes de servir mais utilizadores numa só PON, fazendo com que o consumo por utilizador baixe. Não obstante ao consumo de energia pela rede de acesso, nomeadamente aos componentes do OLT, o maior consumo energético está diretamente associado ao ONT e este estudo conclui que infelizmente este é um valor em crescendo. Embora esses dispositivos não possam ser considerados como pertencentes à rede de acesso, a utilização dos recursos de banda larga fornecidos não será coerentemente interpretada sem a sua inclusão como parte dos componentes principais do consumo de energia nas redes de acesso. Além disso, enquanto o consumo da rede de acesso afeta o operador de telecomunicações, esta perspetiva recai sobre o lado dos consumidores, dando alguma noção sobre o peso dos seus dispositivos na fatura da eletricidade.

Este estudo também é útil para mostrar a importância da melhoria tecnológica e da regulamentação para a redução do consumo nas redes de telecomunicações. A primeira solução mais óbvia para se atingir um grau mais elevado de eficiência energética é melhorar

os perfis de energia dos dispositivos da rede. Isto pode ser conseguido continuando as políticas atuais da Comunidade Europeia em matéria de dispositivos de rede com eficiência energética.

Conclui-se que o FTTH NG-PON2 é consideravelmente mais eficiente que as restantes tecnologias, e mesmo uma atual migração de GPON para NG-PON2 poderá ser de interesse pois possibilitaria a consolidação de CO, algo que se traduz também em menor custos energéticos e logo em menor OPEX. Esta tecnologia é, portanto, nessa perspetiva, mais sustentável a médio prazo. O XG-PON1 também apresentou um desempenho interessante a sua longevidade é um fator a ter em conta na equação e comparavelmente com o NG-PON2 deixa um pouco a desejar.

Quando os dispositivos terminais dos utilizadores são considerados, a situação preocupante. A quota de energia que estes consomem excede em quase uma ordem de grandeza o consumo na rede. É geralmente aceite que o uso das energia nas TIC é partilhada em três partes relativamente semelhantes: servidores, redes e dispositivos. No entanto conclui-se que com a evolução da NGN o equilíbrio está a ser alterado, reduzindo a quota da rede de acesso (ONT) e aumentando proporcionalmente o dos dispositivos terminais (ONT).

No entanto, isso mostra que as reduções no consumo de energia nos ONT terão um impacto muito maior do que o aumento da eficiência da rede, em adição existe a vantagem de reduzir os custos de energia direta dos utilizadores. A respeito disso, enquanto existem orientações específicas para um roteiro sobre a eficiência energética da rede de acesso, para os dispositivos não há especificações equivalentes com semelhante amplo acordo na indústria.

Todos estes resultados sublinham a importância da implementação de estratégias e técnicas económicas e políticas que não desencorajem o uso de tecnologias de ultra-banda larga, mas sim que as torne mais eficientes, incluindo o consumo de energia dos dispositivos do utilizador na equação.

Um último reparo a ser feito é que um pouco de informação sobre o impacto energético da crescente utilização de redes e dispositivos, custos associados e efeitos na sustentabilidade, é normalmente um ponto que falta na maioria dos planos de implantação de redes de telecomunicações. O desenvolvimento de modelos precisos, como os aplicados nesta pesquisa, para alcançar o conhecimento sobre este fator, certamente irá ajudar definir um critério extra para tomar decisões e para adicionar um fator comparação no processo de

seleção do *design* mais conveniente e da tecnologia de rede em cenários específicos sob perspectivas para além do mero investimento económico necessário.

5.2. Trabalho Futuro

Durante os primeiros passos deste projeto de investigação, muitas incertezas surgiram em torno de quais seriam as ferramentas e disciplinas necessárias abordar, a fim de se construir uma simples mas completa forma de análise. Era necessário encontrar um modelo (ou vários) aplicável a diferentes tecnologias e cenários para se atender a diversidade de oferta, típica nesta indústria em evolução. A verdade é que existem poucos modelos para a avaliação energética de uma rede de acesso. Esta escassez é justificada pela desvalorização que se dá ao impacto do consumo energético na rede e também pela dificuldade em se obter resultados fidedignos neste tipo de apreciação. Como tal, como trabalho futuro sugiro a criação de um modelo, orientado para as tecnologias PON que se apresentam como as mais promissoras.

Para análise do consumo energético é necessário ter como base um cenário de implementação, realista e típico para a rede. Este cenário define de forma direta a quantidade de equipamentos ativos necessários para servir os utilizadores dependendo da tecnologia em questão. Este processo é moroso mas no entanto é sistemático. Uma sugestão para um trabalho futuro é o desenvolvimento de uma aplicação/ferramenta que possibilite recriar os cenários com mais celeridade. Como *input* pode-se ter o número de utilizadores, a distância média dos mesmos ao CO, o rácio pretendido e a tecnologia ótica que se pretende utilizar. Como *output* pode-se ter o número de cartas OLT, o número de *splitters*, o custo do material e possível mão de obra, etc.

Enquanto os modelos aqui analisados permitem uma avaliação bastante precisa da energia consumida em estado estacionário, o aumento da precisão pode ser conseguida de muitas maneiras. Na verdade, existem alguns parâmetros cuja evolução pode modificar a energia consumida. Para começar, há o caso das mudanças demográficas, incluindo o total da população, a distribuição etária e a distribuição urbano/rural. As possíveis variações significativas, devido a migrações de áreas rurais para áreas urbanas ou fora do país, por exemplo, afeta a distribuição dos utilizadores no cenário. Todas essas mudanças de fato

afetam diretamente a penetração alvo para cada zona, alterando o número de assinantes e assim, modificando o número de dispositivos ativos para serem implantados. Após uma análise aprofundada, uma das conclusões obtidas foi que uma análise a eficiência energética deve ser acompanhada por uma análise económica ao investimento na implementação da rede. As redes normalmente não atingem a maturidade imediatamente, vão crescendo ao longo dos anos tanto no número de utilizadores como no débito e portanto também cresce a quantidade e o desempenho de equipamentos ativos na rede. Uma sugestão para trabalhos futuros é que se combine uma análise, a médio prazo, da evolução do investimento na implementação da rede com a análise da evolução do consumo energético, de acordo com um plano de implementação e um determinado *take rate* da rede, tendo em conta a evolução do preço dos equipamentos, o preço da mão de obra, o aluguer dos espaços e o preço da eletricidade em si.

Referências

- [1] Cisco® Visual Networking Index, “Cisco VNI: Forecast and Methodology, 2014–2019. The Zettabyte Era: Trends and Analysis,” 2015.
- [2] Ericsson, “Ericsson Energy and Carbon Report,” 2014.
- [3] SCTE - Society of Cable Telecommunications Engineers, “Energy 2020,” SCTE Energy Management Program , 2015. [Online]. Available: http://www.scte.org/SCTE/Areas_of_Interest/Energy_Management/Energy_2020/SCTE/Areas_of_Interest/Energy_2020__Powering_Cable_s_Success.aspx?hkey=47ca1412-e836-4c6d-8380-692badebb3c2.
- [4] ITU, “ITU-T's Definition of NGN,” ITU-T GLOBAL STANDARDS INITIATIVES, [Online]. Available: <http://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/ngn/Pages/definition.aspx>.
- [5] Samuel Dratwa (LOGTEL), “SlideShare,” 2011. [Online]. Available: <http://pt.slideshare.net/samueldr/ngn-ims>.
- [6] European Commission, “Digital Agenda For Europe - A Europe 2020 Initiative,” [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/digital-agenda/en>.
- [7] Keymile, “Ethernet Point-to-Point vs. PON – A comparison of two optical access network technologies and the different impact on operations”.
- [8] Keymile, “AON vs. PON - A comparison of two optical access network technologies and the different impact on operations”.
- [9] Allied Telesyn, “Active vs. PON - FTTx Technologies Choices,” 2004.
- [10] ITU-T, “G.984.1 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics”.

- [11] Arris, “Powering GPON with HFC, a hybrid for a new generation”.
- [12] A. N. Bhagat, “GPON Fundamentals,” [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/amitsciscozone/home/gpon/gpon-fundamentals>.
- [13] ITU-T, “G.987 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms”.
- [14] FSAN, “FSAN & ITU-T Activities on Next-Generation PON Stage-2 (NG-PON2)”.
- [15] ITU-T, “ITU-T Recommendation G.989.2: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specifications”.
- [16] ITU-T, “ITU-T Recommendation G.989.1:40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements”.
- [17] Li Shengping - Huawei, “Single-wavelength rates for 100G access,” Focus, 2016.
- [18] IEEE, “802.3ah Ethernet First Mile Task Force”.
- [19] ITU-T, “IEEE Access Standards,802.3ah GE-PON Status”.
- [20] F. Effenberger, “XG-PON1 versus NG-PON2: Which One Will Win?,” ECOC Technical Digest, New Jersey, 2012.
- [21] Cisco, “Visual Networking Index - Forecast and Methodology,” 2015.
- [22] J. Grabowski, “Cisco High Speed Access Solutions with ME4600,” 2014.
- [23] Cisco, “Cisco ME 4600 Series Optical Line Terminal,” 2014.
- [24] EUROPEAN COMMISSION - Institute for Energy and Transport - Renewable Energy Unit, “Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment Version 5.0,” 2013.
- [25] PT Comunicações, *Cálculo de Atenuações V10*, Lisboa, 2014.
- [26] Ghent University - Sofie Lambert, “Energy Efficiency Analysis of Next-Generation Passive Optical Network (NG-PON) Technologies in a Major City Network,” Ghent,

Belgium, 2014.

- [27] A. G. Christoph Lange, “On the Energy Consumption of FTTH Access Networks,” Berlin, 2009.
- [28] Melbourne University - Jayant Baliga, “Energy Consumption in Access Networks,” Melbourne, Australia, 2008.
- [29] Cisco, “Cisco ME 4600 Series Optical Network Terminal,” Cisco, 2013.