



**Bruno Viriato
Gonçalves Costa
Velo**

**Evolução ADSL para GPON e 4G
- Aspectos de Planeamento e Dimensionamento -**



Universidade de Aveiro
2016

Departamento de Departamento de Eletrónica,
Telecomunicações e Informática

**Bruno Viriato
Gonçalves Costa
Veloso**

Evolução ADSL para GPON e 4G
- Aspectos de Planeamento e Dimensionamento -

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor A. Manuel de Oliveira Duarte, Professor Catedrático do Departamento de Eletrónica Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Ao meu filho Afonso...

O Júri

Presidente

Professor Doutor José Carlos Silva Neves
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Vogal – Arguente Principal

Professor Doutor Luis Manuel de Jesus Sousa Correia
Professor Associado com Agregação, Departamento de Engenharia Eletrónica e de Computadores
do Instituto Superior Técnico

Vogal - Orientador

Professor Doutor Aníbal Manuel de Oliveira Duarte
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível com a superior orientação do Professor Doutor Manuel de Oliveira Duarte a quem agradeço a oportunidade e as condições de trabalho disponibilizadas, mas acima de tudo pela sua inesgotável disponibilidade na partilha do seu vasto conhecimento académico e da sua profunda experiência e dedicação pelo universo das telecomunicações.

Um agradecimento especial aos colegas de curso que comigo partilharam as mais profícuas horas de estudo em especial aos meus amigos Daniel Novo, Diogo Curto e Alison Pereira.

Aos meus pais, José e Imelda que mesmo nos momentos mais difíceis nunca desistiram de mim e de deram todo o apoio, permanente e incondicional.

À minha esposa Cláudia, pelo apoio incondicional, sem ela esta caminhada não teria sido possível, pela motivação e por compreender tantas vezes a razão da minha ausência.

Palavras-chave**Rede de acesso, GPON, FTTx, dimensionamento, capacidade,****Resumo**

Esta dissertação aborda alguns dos desafios que se impõem aos operadores de telecomunicações em virtude das novas dinâmicas de consumo de serviços e ao aumento dos volumes de dados que fluem nas redes.

Neste contexto, o foco da dissertação centra-se nos aspectos de planeamento e dimensionamento de capacidade, particularmente no desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de capacidade de redes GPON – a evolução mais comum das redes fixas baseadas em cobre e tecnologia ADSL- tomando em consideração a natureza aleatória da actividade e a intensidade de consumo dos utilizadores.

Keywords**Access Network, GPON, FTTx, dimensioning, capacity****Abstract**

This dissertation addresses some of the challenges that are imposed on telecommunications operators due to the new dynamics of service consumption and increased volumes of data flowing on the networks.

In this context, this dissertation focuses on the aspects of capacity dimensioning and planning, in particular, through the development of a method for the GPON networks – The common evolution of the fixed lines is based on ADSL copper technology - That consider the random nature of users' activity and intensive consumption-

Índice

ÍNDICE	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS	XXIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJECTIVOS.....	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DAS REDES DE TELECOMUNICAÇÕES	4
2.1 INFRAESTRUTURA FÍSICA DE TRANSMISSÃO	5
2.2 REDE NUCLEAR (<i>CORE</i>).....	6
2.3 REDE DE ACESSO.....	10
2.4 REDE DO CLIENTE.....	12
3. TECNOLOGIAS DA REDE DE ACESSO	13
3.1 TECNOLOGIAS DE COBRE NA REDE DE ACESSO	13
3.1.1 <i>Rede Telefónica Fixa (POTS)</i>	13
3.1.2 <i>Redes DSL</i>	15
3.1.3 <i>G.Fast</i>	24
3.1.4 <i>Redes em Cabo Coaxial</i>	26
3.2 TECNOLOGIAS RÁDIO NA REDE DE ACESSO	29
3.2.1 <i>Redes Celulares</i>	29
3.3 TECNOLOGIAS DE FIBRA ÓPTICA NA REDE DE ACESSO	33
4. MIGRAÇÃO DE REDES ADSL PARA FTTX	35
4.1 FIBRA ÓPTICA NAS REDES ACESSO	36
4.2 ARQUITECTURAS E TECNOLOGIAS DA REDE DE ACESSO ÓPTICA	39
4.3 REDES ÓPTICAS PASSIVAS.....	40
4.3.1 <i>GPON</i>	43
4.3.2 <i>Evolução da Tecnologia PON</i>	47
5. DIMENSIONAMENTO	57
5.1 POWER BUDGET	57

5.2	DIMENSIONAMENTO DE CAPACIDADE EM REDES ÓPTICAS PASSIVAS.....	60
5.2.1	<i>Cenário de estudo</i>	70
6.	ANÁLISE ECONÓMICA E FINANCEIRA – MIGRAÇÃO ADSL-GPON.....	87
6.1	ELEMENTOS DE CUSTO	88
6.2	ANÁLISE ECONÓMICA E FINANCEIRA	90
6.2.1	<i>Mercado</i>	91
6.2.2	<i>Fluxos Financeiros</i>	93
6.2.3	<i>CAPEX</i>	93
6.2.4	<i>OPEX</i>	97
6.2.5	<i>Receitas</i>	100
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
7.1	CONCLUSÕES.....	107
7.2	TRABALHO FUTURO.....	108
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

Índice de Figuras

Figura 1 - Estrutura global das Redes de Telecomunicações [2]	4
Figura 2 – Hierarquia de multiplexagem PDH	7
Figura 3 – Estrutura de multiplexagem para adicionar/extrair um tributário de 64 kbit/s	7
Figura 4 – Estrutura de multiplexagem SDH	8
Figura 5 – Diagrama de comunicações numa rede SDH em anel	9
Figura 6 - Evolução nas redes de acesso fixas e móveis [4]	11
Figura 7 - Soluções tecnológicas para as Redes de Acesso [5]	13
Figura 8 - Estrutura global típica de uma rede de telefónica [6]	14
Figura 9 - Rede de Acesso de Rede Telefónica Fixa [7]	15
Figura 10 - Configuração espectral do ADSL [1]	16
Figura 11 – Modelo esquemático de uma linha telefónica convencional [8].....	16
Figura 12 - Exemplo de um Transformador Híbrido com cancelamento de eco [9]	17
Figura 13 - Modulação DMT nas bandas de Upstream e Downstream FDD - ADSL [10]	18
Figura 14 - Constelação 16-QAM e 64-QAM	19
Figura 15 - Variação da taxa de transmissão (Mbps) com a distância (Km) ao DSLAM, para as 3 tecnologias ADSL mais comuns [11]	20
Figura 16 – Arquitectura de rede utilizando a tecnologia HDSL [12]	22
Figura 17 - Arquitectura de rede utilizando a tecnologia VDSL [13]	24
Figura 18 – Estrutura de uma rede de distribuição G.Fast	25
Figura 19 - Estrutura de uma Rede de Acesso CATV (adaptada de [14])	27
Figura 20 - Estrutura de uma rede de distribuição CATV (adaptada de [14]).....	27
Figura 21 - Plano de Frequências de uma Rede DOCSIS	28
Figura 22 - Estrutura típica de uma rede celular GSM, (adaptada de [17])	29
Figura 23 - Estrutura típica de uma rede de cobre com ADSL [5].....	36
Figura 24 – Redes FTTx [21].....	37
Figura 25 - Arquitecturas de Rede Ponto-a-Ponto (P2P) e Ponto-Multiponto (P2MP).	39
Figura 26 - Estrutura de uma rede PON	41
Figura 27 - Modelo de referência GPON [25].....	45
Figura 28 – Topologia GPON [25]	45
Figura 29 – Comprimentos de onda numa rede GPON	46
Figura 30 - Canal de comunicação downstream baseado em TDM [26]	46
Figura 31 - Canal de comunicação upstream baseado em TDMA [26]	47
Figura 32 - Evolução das tecnologias PON	48
Figura 33- Cenários de aplicação e arquitecturas de rede NG-PON1 [28]	50

Figura 34 - Alocação de comprimentos de onda GPON e XG-PON [29] [30].....	51
Figura 35 - Diagrama de coexistência GPON e NG-PON1 [27].....	51
Figura 36 – Exemplo de uma rede TWDM-PON [31].....	52
Figura 37 - Utilização de diferentes comprimentos de onda por serviço [32].	53
Figura 38 - Alocação de comprimentos de onda NG-PON2 e PON legadas [34].....	54
Figura 39 – Esquemático de coexistência TWDM PON com as PON legadas [33]	54
Figura 40 – Ilustração da perda de potência numa PON com 3 níveis de splitagem	59
Figura 41 – Algoritmo de planeamento de uma rede óptica determinada pelo cálculo do <i>power budget</i>	60
Figura 42 – Esquemático de uma PON com um factor de splitting $1:N$	61
Figura 43 – Função densidade de probabilidade do número de utilizadores simultaneamente activos para diferentes valores de p	62
Figura 44 – Variação da largura de banda disponível em função do número de utilizadores activos (para $N=32$)	63
Figura 45 – Número máximo de utilizadores em função da largura de banda prometida (assumindo $N=32$)	64
Figura 46 – Largura de banda disponibilizada (b_{av}) em função da probabilidade de tempo em que $b_{av} \geq b_{prometida}$	65
Figura 47 – Largura de banda percebida pelos utilizadores em função da probabilidade de actividade	66
Figura 48 – Esquemático de uma PON partilhada por dois tipos de utilizadores	67
Figura 49 – Configuração FTTH, com um único estágio de splitagem que serve dois grupos de utilizadores.....	71
Figura 50 – Variação da largura de banda disponível em função do número de utilizadores activos	72
Figura 51 – Função densidade de probabilidade do número de utilizadores simultaneamente activos em cada grupo	73
Figura 52 – Percentagem de tempo durante o qual é possível garantir uma determinada largura de banda a um conjunto de utilizadores empresariais activos	74
Figura 53 - Percentagem de tempo durante a qual é possível garantir uma determinada largura de banda a um conjunto de utilizadores residenciais activos	75
Figura 54 – Largura de banda média disponível por utilizador em função do factor de actividade	76
Figura 55 – Evolução da probabilidade de actividade, p , ao longo do dia	77
Figura 56 – Variação da largura de banda média não utilizada por grupo de utilizadores ao longo do dia	77
Figura 57 – Variação da largura de banda média disponível por utilizador em função da probabilidade de utilização	78

Figura 58 – Variação da largura de banda média não utilizada na PON ao longo do dia	79
Figura 59 – Variação da largura de banda disponível em função da probabilidade de utilização	80
Figura 60 – Evolução das funções características ao longo do dia	84
Figura 61 – Alocação dinâmica da largura de banda efectiva pelos grupos de utilizadores	85
Figura 62 - Largura de banda percebida pelos utilizadores ao longo do dia	86
Figura 63 – Modelo simplificado de uma rede ADSL	87
Figura 64 – Modelo simplificado de uma rede FTTH	88
Figura 65 – GPON OLT Alcatel-Lucent 7342 ISAM FTTU	89
Figura 66 – Solução FTTH com itens considerados e os respectivos rácios	90
Figura 67 – Comportamento do mercado para cada cenário ao longo do tempo	92
Figura 68 – Investimento por ano de projecto para os 3 cenários	96
Figura 69 – Evolução do Opex para os três cenários	99
Figura 70 – Receitas ao longo do tempo de projecto em função dos 3 cenários.....	101
Figura 71 – Balanço dos três cenários	103
Figura 72 – Representação de todos os resultados (cenário Optimista)	104

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Velocidades e distâncias das variantes ADSL	21
Tabela 2 - Nomenclatura das ligações em fibra	41
Tabela 3 – Atenuações por elemento de rede	59
Tabela 4 – Requisitos de largura de banda por serviço	81
Tabela 5 – Orquestração de serviços de utilizadores empresariais e requisitos de largura de banda em função do perfil de consumo.....	81
Tabela 6 – Orquestração de serviços de utilizadores residenciais e requisitos de largura de banda em função do perfil de consumo.....	82
Tabela 7 – Custo e rácios dos 3 itens considerados.....	89
Tabela 8 – Valores das variáveis para os diferentes cenários	91
Tabela 9 – Evolução do número de utilizadores	92
Tabela 10 - Material necessário em cada ano	94
Tabela 11 – Investimento anual discriminado por item	95
Tabela 12 – Investimento acumulado (depreciado)	97
Tabela 13 – Opex do cenário Optimista	99
Tabela 14 – Custos mensais	100
Tabela 15 – Receitas em função dos custos Anuais devidos aos clientes Empresariais e residenciais.....	101
Tabela 16 – Resultados dos indicadores económicos	105

Lista de Siglas e Acrónimos

ADM	Add/Drop Multiplexer
ADSL	Assymmetric Digital Subscriber Line
AES	Advanced Encryption Standard
AM	Amplitude Modulation
AON	Active Optical Network
APON	ATM Passive Optical Network
ATM	Assynchronous Transfer Mode
BPON	Broadband Passive Optical Network
BRAS	Broadband Remote Access Server
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Trasnceiver Station
CATV	Community Antenna Television
CDMA	Code-Division Multiple Access
CE	Co-existence Element
CM	Cable Modem
CMTS	Cable Modem Termination System
CO	Central Office
CoMP	Coordinated multipoint transmission/reception
CPE	Customer Premisse Equipment

DBA	Dynamic Band Allocation
DMT	Discrete Multi-Tone
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DPU	Distribution Point Unit
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DVB RCS	Digital Video Broadcast Return Channel System
DVB-T	Digital Video Broadcasting - terrester
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
DXC	Digital Cross Connect
EPON	Ethernet Passive Optical Network
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FM	Frequency Modulation
FSAN	Full Service Access Network
FTTB	Fiber to the Building
FTTC	Fiber to the Curb
FTTcab	Fiber to the Cabinet
FTTH	Fiber to the Home
FTTN	Fiber to the Node
FTTP	Fiber to the Premises
FTTx	Fiber to the x
G.Fast	Fast Access to Subscriber Terminals

GEM	GPON Encapsulation
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HDSL	High-Bit-Rate digital Subscriber Line
HFC	Hybrid Fiber Coax
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
ICIC	Inter-cell interference coordination
IMT	International Mobile Telecommunications Advanced
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
IRR	Internal Rate Return
ISDN	Integrated Service Digital Network
LAN	Local area Network
LTE	Long Term Evolution
MAN	Metro Access Network
MDF	Main Distribution Frame
MSC	Mobile Switching Center
NGA	Next Generation Access
NG-PON	Next-Generation Passive Optical Network
NPV	Net Present Value
ODN	Optical Distribution Network

OFDM	Orthogonal Frequency Divisio Multiplexing
OLT	Optical Line Temination
ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Unit
P2MP	Poit to Multipoint
P2P	Point to Poit
PDH	Plesiochronus Digital Hierarchy
PON	Passive Optical Network
POTS	Plain Old Telephony Service
PSTN	Public Switched Telephone Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
REDIS	Rede Digital Integrada de Serviços
RoF	Radio Over Fiber
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SHDSL	Symmetric High-Speed Digital Subscriber Line
SMS	Small Messages Service
SNR	Signal to Noise Ratio
SONET	Synchronous Optical Networking
STM	Synchronous Transport Module
T-CONT	Transmission Container
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Acces

TDT	Televisão Digital Terrestre
TM	Terminal Multiplexer
TWDM	Time and Wavelength Division Multiplex
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTP	Unshielded Twisted Pair)
VDSL	Very High Data Rate Digital Subscriber Line
VHF	Very High Frequency
VoIP	Voice Over IP
VoIP	Voice Over IP
W-CDMA	Wide-Band Code-Division Multiple Access
WDM	Wavelength Division Multiplex
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

1. Introdução

1.1 Motivação

O sector das Telecomunicações tem evoluído de uma forma acelerada nas últimas décadas. Alguns dos marcos mais significativos dessa evolução foram a digitalização de todos os segmentos de rede, a introdução de tecnologias de alto débito, o alastramento do celular e de sistemas com níveis crescentes de inteligência na gestão e operação das redes. Daqui resultaram condições propícias que novos serviços aparecessem vindo dar uma nova dinâmica ao mercado das telecomunicações. Dentre os novos serviços merecem especial destaque os que são baseados na Internet, uma entidade/estrutura algo difusa [1] resultante da combinação de modos de transmissão e encaminhamento de informação em formato digital, organizada em pacotes dotados de elementos de identificação que permitem o seu trânsito nas redes de forma fluida e eficiente. Quando a essa entidade/estrutura se acrescentaram protocolos de comunicação entre sistemas informação distribuídos e colaborativos – o mais conhecido dos quais é o HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) – surgiu a *world wide web* e com ela toda um novo ecossistema de comunicação. Pode-se dizer que as formas de viver das pessoas e das organizações se transformaram de uma forma que as torna hoje muito diferentes do que eram há algumas décadas atrás.

Um dos efeitos mais sentidos como consequências das novas dinâmicas do mercado das telecomunicações é o aumento explosivo dos volumes de dados que circulam nas redes exigindo-lhes débitos e larguras de banda cada vez mais elevados. Está-se, pois, num momento de confronto entre duas realidades simultaneamente complementares e dicotómicas:

- As redes modernizaram-se, alargaram-se e oferecem cada vez mais recursos.
- Os utilizadores aderiram, incorporaram esses recursos nos seus padrões de vida e trabalho, tornaram-se cada vez mais dependentes da sua utilização e intensificando o seu uso daí resultando novos desafios de reforço das capacidades e funcionalidades das redes.

As Telecomunicações assumiram assim, na actualidade, um papel catalisador do crescimento económico e da coesão social.

O Parlamento Europeu, na sua resolução de 6 de Julho de 2001: “Banda larga europeia: investir no crescimento induzido pelas tecnologias digitais” (12) realça que os serviços de banda larga são cruciais para a competitividade da indústria da UE e contribuem fortemente

para o crescimento económico e para o emprego de qualidade. Acrescentando ainda que o investimento tecnológico no sector das Telecomunicações é fundamental se a EU pretender ser um centro de inovação de conhecimento e de serviços. Na sua resolução de 12 de Setembro de 2013: “Agenda digital para o crescimento, a mobilidade e o emprego” define como metas e perspectivas da Agenda digital 2020 a ligação de todos os agregados familiares a redes de banda larga com débitos de 100Mbps e que 50% dos agregados possuam contratos com débitos de 1Gbps.

O grande desafio que actualmente se coloca aos operadores é responder aos períodos de pico de tráfego e essa é já uma realidade cada vez mais comum nos serviços móveis.

Importa por isso que os operadores estejam preparados para os próximos desafios. Com o contínuo crescimento da procura dos novos serviços a exigirem cada vez mais largura de banda como por exemplo a TV 4K ou a massificação dos serviços de *Cloud Computing*, bem como o expectável surgimento das redes móveis 5G.

É expectável que as redes 5G que surgirão no início da próxima década tenham um alcance de cobertura muito menor que as redes actuais, o que exigirá uma maior ramificação do *backhaul* fixo e simultaneamente maior capacidade ao nível da largura de banda. Neste sentido, as redes fixas, ditas legadas, continuarão a desempenhar um papel crucial no futuro das redes de Telecomunicações. A aposta nas redes fixas é por isso o caminho adoptado pelos operadores para garantir não apenas a qualidade dos novos serviços fixos, mas também para assegurar a evolução qualitativa dos serviços proporcionados pelas redes móveis.

Actualmente a convergência nas redes de transporte é já uma realidade. A grande revolução continua a ser ao nível das redes de acesso e a transição de cobre para fibra óptica tem sido a opção técnica e económica mais consensual.

1.2 Objectivos

Em termos gerais, esta dissertação visa contribuir para uma melhor compreensão dos desafios que se colocam na modernização das redes de acesso de telecomunicações, em particular na transição em curso das tecnologias do cobre para as tecnologias da fibra.

Em termos específicos, o objectivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de métodos de dimensionamento de capacidade de redes GPON (*Giga Bit Passive Optical Network*) – a evolução mais comum das redes fixas baseadas em cobre e tecnologia ADSL (*Asynchronous Digital Subscriber Line*) – tomando em consideração a natureza aleatória da sua activação por parte dos utilizadores.

Trata-se de uma abordagem com grande relevância para o projecto economicamente eficiente de redes de acesso.

1.3 Estrutura do Trabalho

A presente dissertação está organizada em 6 capítulos e referências bibliográficas, estruturados da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Introdução:** Neste capítulo é apresentado o enquadramento, os objectivos propostos e a estrutura da presente dissertação
- **Capítulo 2 – Estrutura e Organização das Redes de Telecomunicações:** Este capítulo apresenta uma descrição sobre a evolução e actualidade das Redes de Telecomunicações ao nível da sua estrutura, organização e tecnologias que as suportam. Referenciando ainda os meios físicos de transmissão utilizados nos diferentes segmentos de rede.
- **Capítulo 3 – Tecnologias da Rede de Acesso:** Neste capítulo são apresentadas as diferentes tecnologias existentes nas redes de acesso.
- **Capítulo 4 – Migração de Redes ADSL para FTTx:** Este capítulo aborda a evolução das redes de acesso de cobre para fibra óptica. Aqui se descrevem as actuais redes e tecnologias ópticas e as que previsivelmente lhes poderão suceder.
- **Capítulo 5 – Dimensionamento:** Neste capítulo é efectuada uma abordagem a dois aspectos fundamentais de dimensionamento – *Power budget* e *Capacidade*, sendo dada especial enfoque às questões de capacidade, apresentando uma abordagem matemática face às perspectivas de distribuição e utilização da largura de banda disponibilizada pela tecnologia GPON.
- **Capítulo 7 – Análise económica e financeira: Migração ADSL – GPON:** Neste capítulo apresenta-se um estudo económico e financeiro de migração de uma rede de acesso ADSL para um cenário FTTH.

2. Estrutura e Organização das Redes de Telecomunicações

Por forma a compreender a evolução e a actualidade das redes de telecomunicações é importante conhecer a sua estrutura e organização. Apesar do presente trabalho se centrar na rede de acesso é importante apresentar uma visão global de todos os segmentos que constituem as Redes de Telecomunicações.

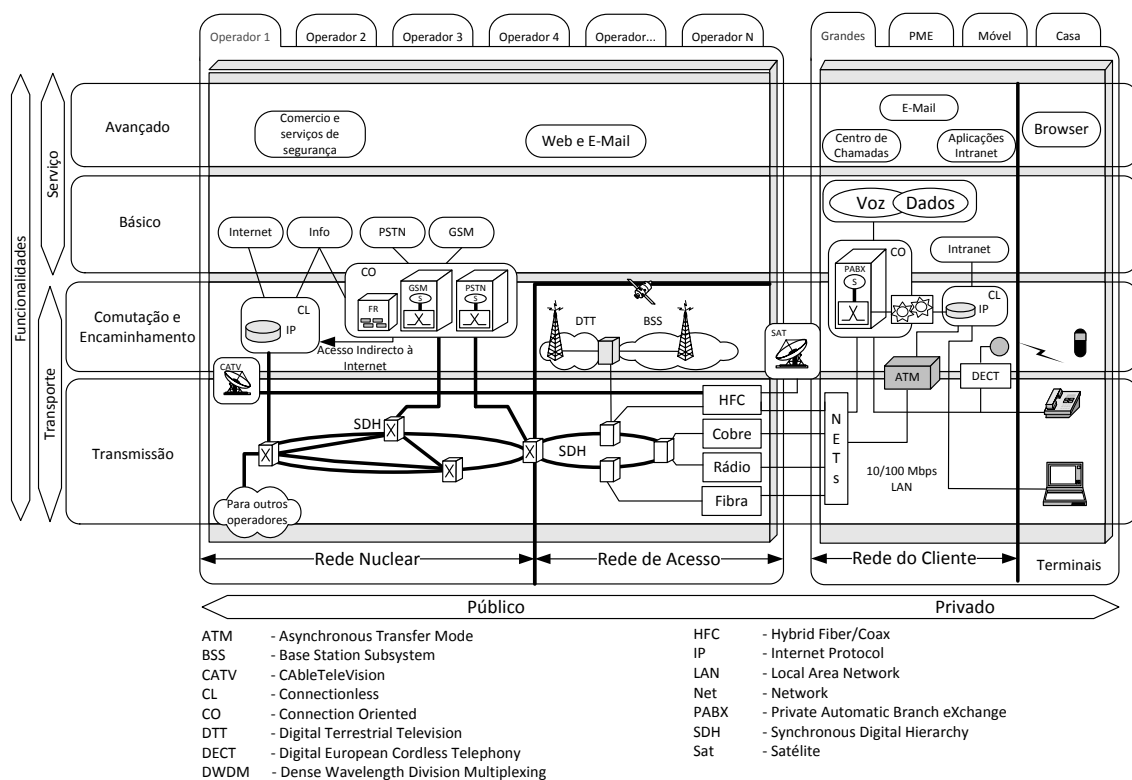


Figura 1 - Estrutura global das Redes de Telecomunicações [2]

A Figura 1 ilustra a estrutura global das redes de telecomunicações e tem dois eixos de leitura.

- Leitura horizontal – Evidência os três grandes segmentos em que tradicionalmente se organizam as redes de telecomunicações:
 - a) Rede Nuclear
 - b) Rede de Acesso
 - c) Rede de Cliente

- Leitura Vertical – Evidência os recursos e as funcionalidades essenciais das redes:
 - a) Transporte – Inclui a Transmissão e a Comutação/ Encaminhamento
 - b) Serviço – Incluindo a disponibilidade de vários serviços fixos e móveis, sobre os quais é possível implementar serviços e aplicações associados (Web, email, etc.)

A Rede de Transporte é responsável pela interligação dos pontos de agregação (tipicamente os *Central Office*). Trata-se de uma rede que cobre longas distâncias recorrendo maioritariamente a fibra óptica. Fornece à camada de Serviços os recursos adequados para a transferência de dados, independentemente dos serviços, e é responsável por funcionalidades tais como a transmissão e multiplexagem.

A Camada de Serviços disponibiliza:

- Serviços fixos de voz e dados sobre as redes telefónicas (PSTN - *Public Switched Telephone Network*)
- Serviços de voz e dados sobre as redes celulares (GSM,UMTS,LTE)
- Serviços de voz, dados e vídeo sobre a rede de cabo (CATV)

2.1 Infraestrutura Física de Transmissão

A infraestrutura física de transmissão inclui os meios físicos utilizados (cobre, fibra, rádio) e todos os recursos envolvidos (valas, condutas, postes, torres, etc.)

Os meios físicos de transmissão utilizados nos diferentes segmentos de rede são os seguintes:

- **Linhas de Cobre:**
 - a) Par de Cobre entrelaçado – Utilizado nas redes telefónicas POTS (*Plain Old Telephony Service*) e redes DSL (*Digital Subscriber Line*);
 - b) Cabo Coaxial – Inicialmente utilizado para transmitir sinal de televisão e posteriormente utilizado também para transmissão de voz, dados e vídeo. Utilizado nas redes CATV (*Community Antenna Television*) e HFC (*Hybrid Fiber Coax*);
- **Linhas de Fibra Óptica** – Utilizada para transmissões de alto débito, inicialmente nas redes nucleares, é hoje a opção preferencial das redes de acesso de nova geração;
- **Ondas de Rádio:**

- a) *Wireless* – Utiliza tecnologias de acesso rádio e permite oferecer serviços celulares como GSM,UMTS, LTE e WIMAX. No interior dos edifícios e em áreas corporativas, merece atenção especial a tecnologia Wi-Fi.
- b) Televisão Digital Terrestre (TDT) – Utiliza tecnologias DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*) que permitem transmitir em *broadcast* serviços de televisão digital terrestre nas bandas de frequência VHF e UHF, recorrendo à modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).
- c) Satélite – Actualmente o padrão DVB RCS (*Digital Video Broadcast Return Chanel System*) é o mais utilizado para transmissão de dados por satélite. Este padrão permite, além da difusão de televisão, gerar canais de retorno capazes de transmitir tráfego de banda larga em regiões do globo isoladas de qualquer sistema de telecomunicações.
- d) Difusão Rádio – Utiliza maioritariamente as técnicas de modulação AM e FM, para transmitir ondas rádios.

A escolha da tecnologia depende da largura de banda, da distância, das condicionantes geográficas e da utilização que se pretende fazer.

2.2 Rede Nuclear (*core*)

A Rede Nuclear fornece as infraestruturas físicas e lógicas para interligar as diversas Redes de Acesso e é responsável pela agregação de enormes volumes de tráfego, transmitido a grandes distâncias, através de tecnologias de transporte.

A primeira técnica de transporte a ser utilizada em larga escala foi o PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*).

No sistema PDH a multiplexagem é executada de forma assíncrona. Apesar dos relógios dos sinais tributários apresentarem a mesma frequência nominal as suas frequências reais de operação são diferentes. Para ultrapassar a falta de sincronismo entre os diferentes elementos de rede (regeneradores e multiplexers), são adicionados bits de justificação aos tributários

A primeira hierarquia PDH Europeia define a multiplexagem de 30 canais de 64kbit/s (as hierarquias Americana e Japonesa utilizam um sistema com 24 canais de 64 kbit/s). As hierarquias de ordem superior obtêm-se pela multiplexagem de 4 de ordem inferior, permitindo aumentar a capacidade das redes de transmissão PDH.

A Figura 2 esquematiza a hierarquia de multiplexagem PDH.

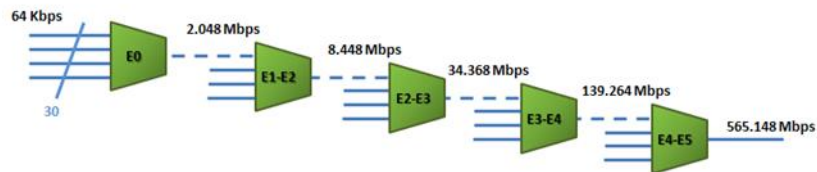


Figura 2 – Hierarquia de multiplexagem PDH

Os canais multiplexados E1,E2,E3,E4 são frequentemente designados pelos seus débitos aproximados: 2 Mbit/s, 8 Mbit/s, 34 Mbit/s, 140 Mbit/s e 565 Mbit/s.

O processo de multiplexagem apresentado na Figura 2 mostra a dificuldade e a complexidade exigida para aceder aos tributários. Este processo é igualmente aplicado para a inserção de dados num determinado tributário (Figura 3), revelando uma fraqueza importante da tecnologia PDH.

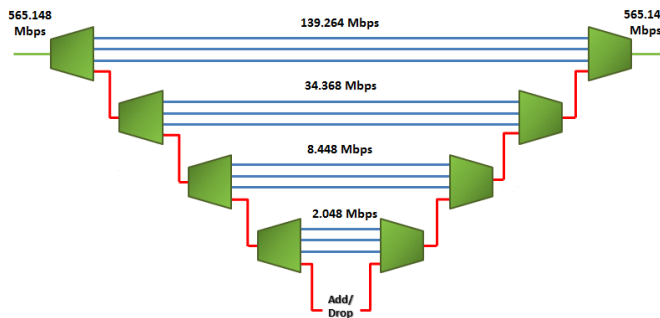


Figura 3 – Estrutura de multiplexagem para adicionar/extrair um tributário de 64 kbit/s

Face às limitações da tecnologia PDH surgem as tecnologias SONET¹ (*Synchronous Optical Networking*) e SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*).

A hierarquia SDH é definida pelo ITU-T como norma internacional (G.783) e permite o transporte de sinais PDH [3].

Nos sistemas SDH, o nível hierárquico básico de transmissão designa-se STM-1 (*Synchronous Transport Module level 1*). A Figura 4 mostra como se formam as tramas STM-1, a partir de tributários com débitos binários inferiores e como é feita a agregação de sinais PDH e ainda como se realiza a multiplexagem para obter tramas de ordens hierarquicamente superiores ao STM-1.

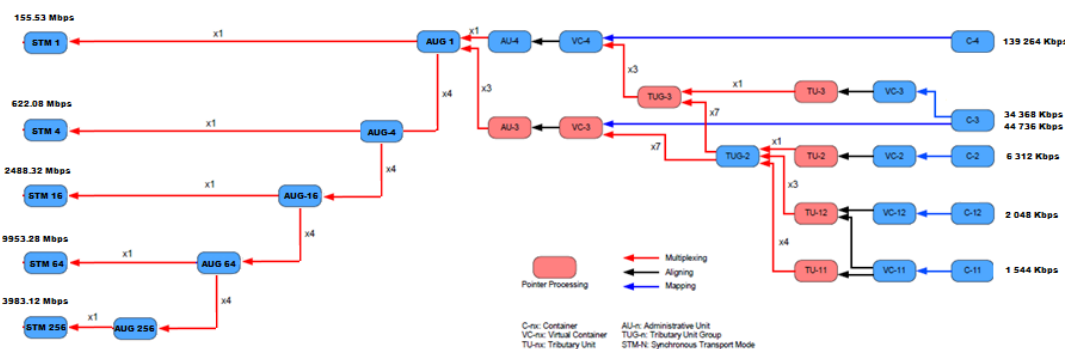


Figura 4 – Estrutura de multiplexagem SDH

A Figura 5 apresenta a estrutura tipicamente utilizada pelos sistemas SDH nas redes core. É possível ver como a rede está adaptada para transmitir várias hierarquias PDH, ATM (Asynchronous Transfer Mode) e SONET.

¹ A hierarquia digital SONET corresponde ao padrão americano e foi proposta pela Bellcore para transportar sinais em redes ópticas.

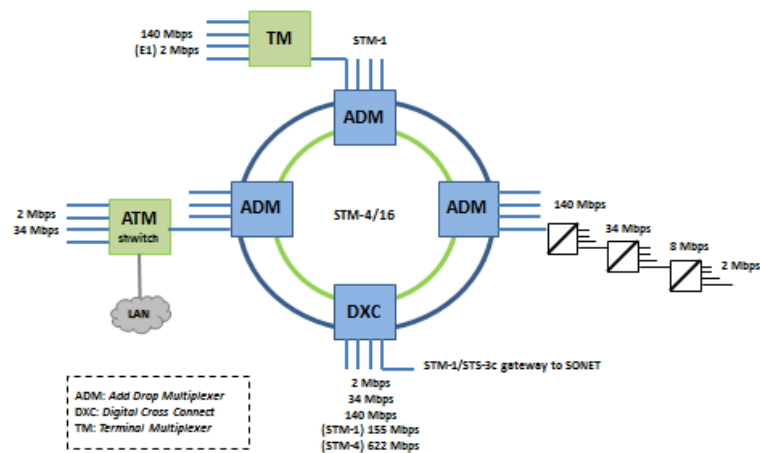


Figura 5 – Diagrama de comunicações numa rede SDH em anel

Para uma melhor compreensão da Figura 5, são descritos os elementos de rede assinalados:

- **TM (Terminal Multiplexer)** – Combina os sinais/tributários PDH ou SDH para formar um sinal STM-N de débito mais elevado.
- **ADM (Add/Drop Multiplexer)** – Permite inserir e extrair sinais PDH ou SDH de baixo débito, directamente a partir do sinal STM-N que passa neste equipamento. Este equipamento permite que a extracção/inserção de tributários de/num sinal de ordem superior seja efectuada sem recurso às cadeias de multiplexagem/demultiplexagem como acontecia nos sistemas PDH.
- **DXC (Digital Cross Connect)** – Tem um funcionamento semelhante ao ADM, com a vantagem de permitir a ligação a vários elementos de rede e efectuar a comutação de sinais entre eles.

O SDH foi durante as últimas décadas predominante nas redes *core* para transmissão de informação, apesar da tecnologia Gbit Ethernet² surgir nas redes *core* com a vantagem de

² Em 1998 foi padronizada a norma 802.3z do IEEE que define o padrão Gbit Ethernet, e torna viável a utilização de fibra óptica a 1Gbit/s.

utilizar a estrutura Ethernet (IEEE 802.3) e manter nos equipamentos a informação nesse formato.

O poder da tecnologia SDH assenta na simplicidade e flexibilidade da sua multiplexagem, capaz de convergir com outras tecnologias, fornece transporte ao PDH, ATM e IP numa única estrutura física. Não despreciable é o facto de ser uma tecnologia versátil ao nível das suas topologias, particularmente na sua facilidade de crescimento e ainda pelos mecanismos de protecção da secção de multiplexagem, bem como na protecção de caminhos.

Inicialmente os elementos de rede SDH interligados directamente por cabos de fibra óptica, utilizavam apenas um comprimento de onda por fibra. Contudo a crescente necessidade de largura de banda conduz ao surgimento de tecnologias que tornam possível a transmissão de múltiplos sinais SDH por fibra, recorrendo à multiplexagem do comprimento – WDM (*Wavelength Division Multiplex*) e o DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), que através de um menor espaçamento entre diferentes comprimentos de onda permite o transporte de maior número de sinais na mesma fibra no mesmo período temporal.

O DWDM permite aos operadores a flexibilidade necessária para ampliar a capacidade da sua rede de transporte reaproveitando toda a estrutura física herdada pelas tecnologias ópticas precedentes e diminuindo o número de repetidores necessários ao longo do percurso óptico. Enquanto na tecnologia TDM (*Time Division Multiplexing*) se exigia um repetidor a cada 40km de fibra, com o DWDM só existe essa necessidade a cada 120km, com a vantagem acrescida de cada fibra utilizar vários canais de comunicação.

2.3 Rede de Acesso

As Redes de Acesso têm o papel primordial de ligar os equipamentos do cliente ao provedor de serviços. A sua estrutura básica está ilustrada na Figura 1.

As actuais redes de acesso são basicamente o resultado da sobreposição das infraestruturas “herdadas” das seguintes redes:

- Telefónica;
- TV Cabo;
- Rádio
- Combinação de Rádio e Fibra Óptica (RoF)

No passado estas quatro redes eram estanques entre si. Actualmente interligam-se e interpenetram-se.

As primeiras tecnologias de transmissão de dados na Rede de Acesso surgiram orientadas para a rede telefónica e não permitiam simultaneidade de serviços de voz e dados.

Posteriormente surgiam outras tecnologias com o objectivo de possibilitar a integração de voz e dados:

- RDIS, na década de 80
- DSL, na década de 90

No caso da rede de Televisão por cabo a tecnologia DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) surgiu com o propósito de integração semelhante aos anteriormente mencionados: A difusão de televisão acrescida da transmissão de voz e dados.

O crescimento de tráfego propulsionado pelos serviços que a digitalização das redes veio proporcionando (serviços web, email, etc.) não tem parado, criando necessidades cada vez maiores de largura de banda a disponibilizar aos utilizadores.

Na Figura 6 podemos observar a evolução das tecnologias e dos débitos das redes de acesso.

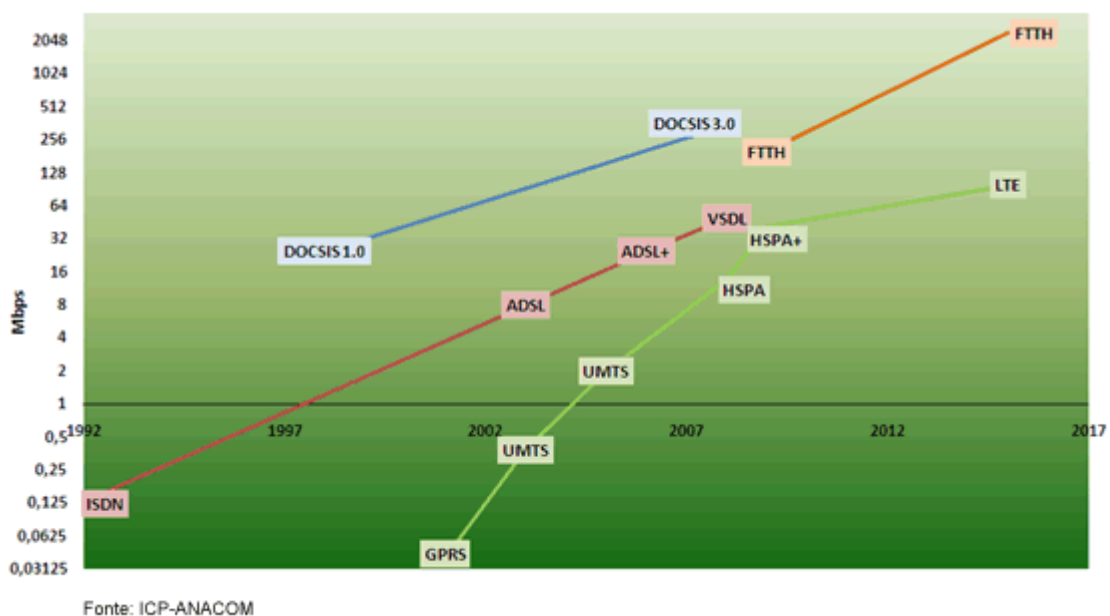


Figura 6 - Evolução nas redes de acesso fixas e móveis [4]

Num futuro próximo a evolução nas redes de acesso parece vir a estar focada essencialmente na intensificação da tecnologia de redes de fibra óptica (NG PON, WDM PON) e móveis (LTE), com débitos expectáveis de 10Gbps para a fibra e 1Gbps nas redes móveis [4].

2.4 Rede do Cliente

A Rede do Cliente consiste no último segmento de rede de acesso e corresponde à rede do edifício onde o cliente se encontra, providenciando a interligação entre os equipamentos terminais e a rede de acesso.

Importa salientar que, ao nível do segmento empresarial de grandes dimensões a rede do cliente pode representar a replicação estrutural de uma rede de acesso. No caso específico das redes sem fios pode compreender não só as tecnologias *Wi-Fi* mas também elementos das redes celulares, na forma de: (i) pico células, (ii) nano células e (iii) fento células.

Existem vários suportes físicos que podem ser encontrados neste último segmento de uma rede de telecomunicações:

- Cobre – (i) Par de Cobre entrelaçado³, (ii) Cabo Coaxial
- Fibra Óptica
- Rádio – (i) Wi-Fi (IEEE 802.11), (ii) GSM, (iii) UMTS, (iv) LTE
- Combinação de Rádio e Fibra Óptica (RoF)

A tecnologia a utilizar dependerá do tipo de cliente, da dimensão da infraestrutura (edifício), do número de utilizadores a abranger e naturalmente do tipo de serviço a fornecer.

³ Normalmente, na configuração UTP (*Unshielded Twisted Pair*)

3. Tecnologias da Rede de Acesso

A Figura 7 sumaria as tecnologias de transmissão normalmente utilizadas nas redes de acesso.

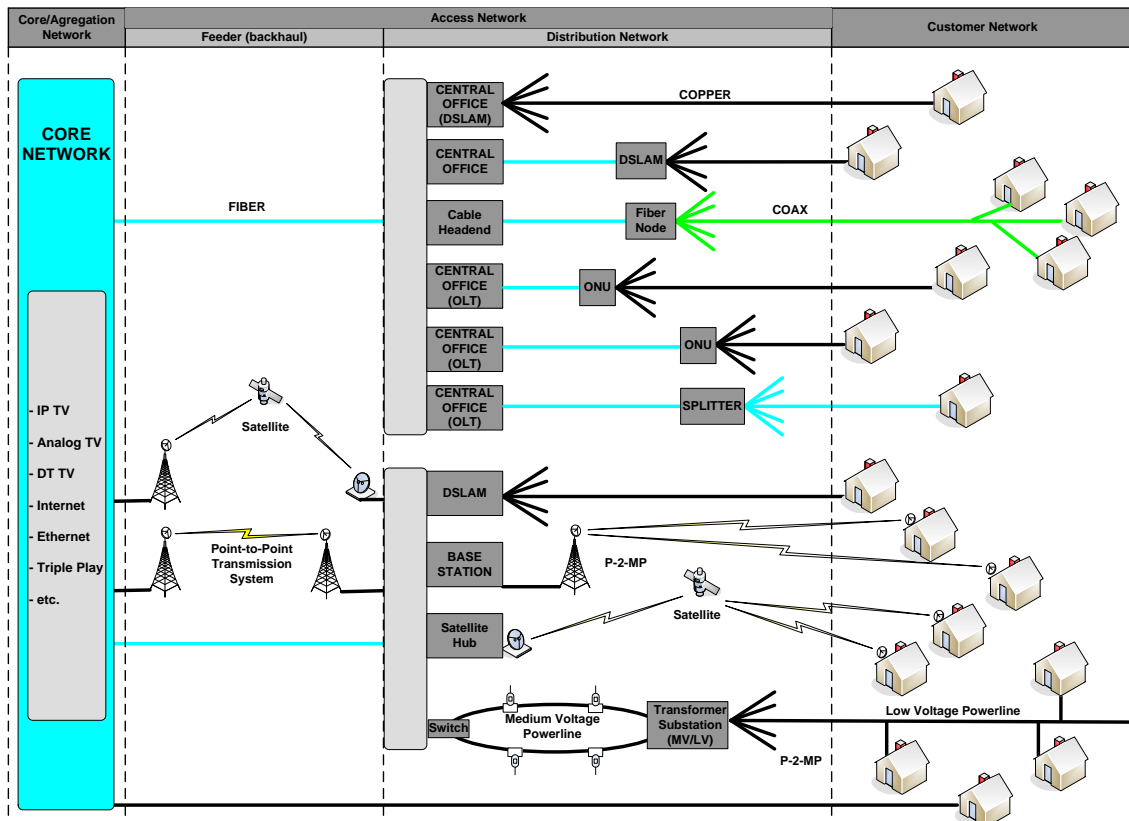


Figura 7 - Soluções tecnológicas para as Redes de Acesso [5]

Seguidamente apresenta-se uma descrição sucinta destas tecnologias.

3.1 Tecnologias de Cobre na Rede de Acesso

3.1.1 Rede Telefónica Fixa (POTS)

A rede telefónica fixa foi originalmente criada para permitir a comunicação por voz. O serviço oferecido (POTS – *Plain Old Telephone Service*) apoiava-se na transmissão em banda base

através de linhas de pares de cobre entrelaçado e na comutação de circuitos (PSTN – *Public Switched Telephone Network*).

Ao longo do tempo estas redes atingiram um grau de cobertura quase global, dando origem uma das infraestruturas mais complexas e de maior custo á face do planeta.

O par de cobre entrelaçado é constituído por dois fios de cobre isolados, que entrelaçados entre si cancelam as interferências electromagnéticas e formam uma linha de transmissão com impedância característica e uma função de transferência do tipo filtro passa-baixo.

A Figura 8 representa uma estrutura típica da rede acesso telefónica tradicional, tendo o cobre como meio físico de interligação entre o *Central Office* e os utilizadores. A partir do repartidor principal (MDF – *Main Distribution Frame*), responsável pela ligação entre a rede de cabos e o equipamento de comutação (PSTN *switch*), os cabos estendem-se até à residência do utilizador.

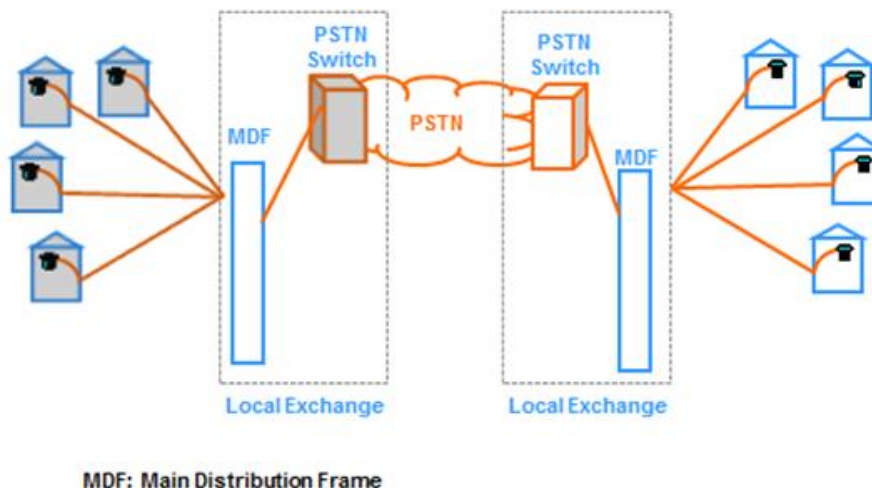


Figura 8 - Estrutura global típica de uma rede de telefónica [6]

A Figura 9 apresenta a estrutura típica do segmento de acesso da rede telefónica, destacando-se os seguintes elementos de rede:

- **Repartidor Principal (MDF – *Main Distribution Frame*):**
Trata-se do ponto de flexibilidade e onde se estabelece a ligação entre os cabos que vão para o utilizador e os órgãos interiores da central que o servem: (i) no passado a central de comutação (ii) no presente a central de comutação e os equipamentos de encaminhamento.
- **Sub Repartidores**

Trata-se de pontos de flexibilidade onde os cabos com origem no repartidor principal, normalmente constituído por largas centenas, ou milhares de pares de cobre se ramifica em direcção a vários agrupamentos de utilizadores finais.

- **Pontos de Distribuição**

A função é semelhante á dos Sub Repartidores, a uma escala mais reduzida, com ligações individualizadas ao ponto de consumo final (casa, empresa, etc)

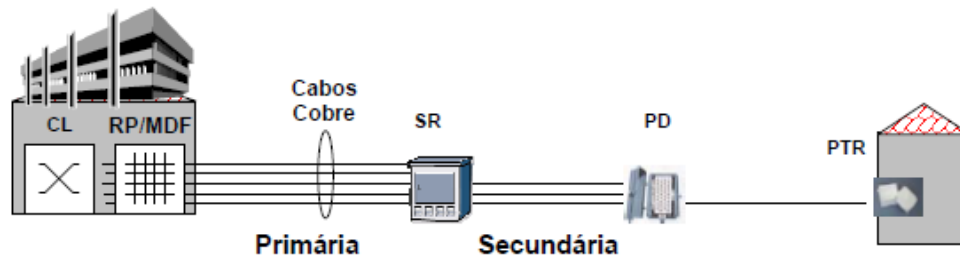


Figura 9 - Rede de Acesso de Rede Telefónica Fixa [7]

A primeira grande evolução na rede de acesso correspondeu ao processo de digitalização da comutação e transmissão entre centrais. Face a esta evolução os operadores investiram no sentido de levar a digitalização até ao ponto de consumo final. A tecnologia RDIS (Rede Digital com Integração de Serviços) ou ISDN (*Integrated Service Digital Network*) foi a tecnologia adoptada para responder a este desafio, permitindo ao mesmo tempo a integração de voz e dados na mesma infraestrutura de rede. Contudo, o rápido crescimento da procura de largura de banda, rapidamente tornou obsoleta esta tecnologia.

3.1.2 Redes DSL

As redes telefónicas de cobre surgiram para transmitir sinais de voz numa faixa de frequência até cerca de 4KHz. Esta limitação de largura de banda impunha grandes restrições à transmissão de dados. Durante algumas décadas recorreu-se a *modems dial-up* que compactavam os sinais de dados na faixa de frequência até 4 KHz mas as velocidades atingidas não passavam de algumas dezenas de quilo bits por segundo (kbps).

Para ultrapassar o problema da largura de banda nas redes telefónicas surgiram as tecnologias DSL (*Digital Subscriber Line*).

As tecnologias DSL aparecem nos anos 90 do século passado, desenvolvidas pela Bellcore recorrendo à zona do espectro acima dos 4KHz. Tal desiderato foi conseguido através da aplicação de técnicas de modulação que adiante serão explicadas

Estas tecnologias recorrem á multiplexagem na frequência dos sinais de voz e dados, tal como ilustra a Figura 10, aproveitando a zona superior do espectro de frequência que permanecia inutilizada, transmitido nessa gama os sinais de dados.

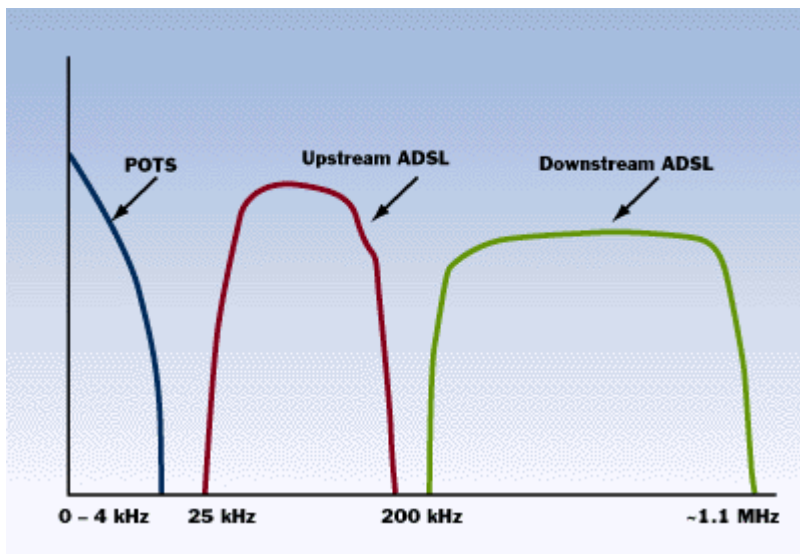


Figura 10 - Configuração espectral do ADSL [1]

Um dos problemas encontrados nas redes telefónicas, que compromete a utilização da zona superior do espectro pelas tecnologias DSL é a existência dos transformadores híbridos nos telefones dos utilizadores. Os transformadores híbridos são utilizados para permitir que os dois pares de cobre, do auscultador e do microfone se liguem a um único par da rede telefónica, tal como ilustra a Figura 11.

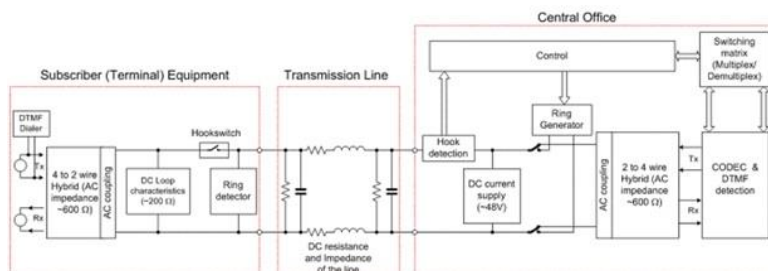


Figura 11 – Modelo esquemático de uma linha telefónica convencional [8]

As características da linha são muito dependentes da frequência (para frequências inferiores a 10KHz a impedância característica é aproximadamente 600Ω e 150Ω para as altas frequências.) Assim, uma linha adaptada para baixas frequências está desadaptada para as altas frequências, originando interferência e reflexões indesejadas. Tal facto exige a utilização de filtros capazes de separar as frequências e permitir a utilização simultânea da rede para transmissão de dados e voz analógica.

A título de exemplo a Figura 12 mostra o esquema de um transformador híbrido em que o sinal transmitido (Tx) é cancelado com uma cópia invertida, evitando interferência entre o receptor e o transmissor (*Near End Cross Talk*). Para isso, a impedância Z (entre os portos A e B) deve estar adaptada com a mesma impedância vista da linha de transmissão.

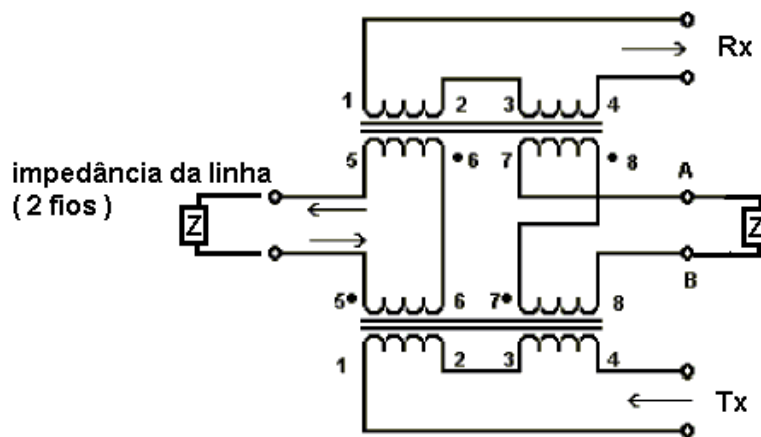


Figura 12 - Exemplo de um Transformador Híbrido com cancelamento de eco [9]

A velocidade de transmissão de dados nas redes de cobre é condicionada pela atenuação do sinal (proporcional ao comprimento da linha) e pela frequência de transmissão (mais elevada nas altas frequências). Para minimizar este efeito, o ITU-T standardizou a modulação DMT (*Discrete Multi-Tone*) para sistemas ADSL.

O DMT é uma técnica de modulação por multi-portadoras (FDM – *Frequency Division Multiplexing*) em que cada uma das bandas (*upstream e downstream*) é modulada por uma sequência derivada de um processo de decimação que divide o espectro de frequências utilizado para transmissão em 256 canais de aproximadamente 4Khz de largura de banda.

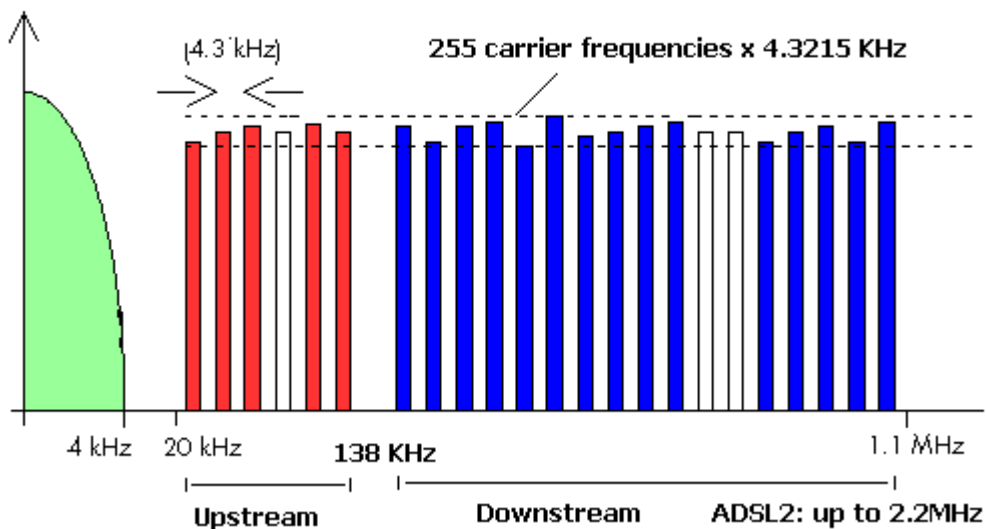


Figura 13 - Modulação DMT nas bandas de Upstream e Downstream FDD - ADSL [10]

Cada canal é individualmente modulado em QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

Na modulação QAM os símbolos são separadamente tratados por duas portadoras e as componentes obtidas definem a componente de fase e de quadratura, construindo uma constelação no espaço do sinal. O sinal de QAM é composto por duas portadoras em quadratura (desfasadas 90° entre si), em que cada uma delas é modulada por um conjunto de amplitudes discretas.

Os M símbolos resultam do agrupamento $\log_2 M$ bits, formando diferentes constelações M-QAM (Figura 14).

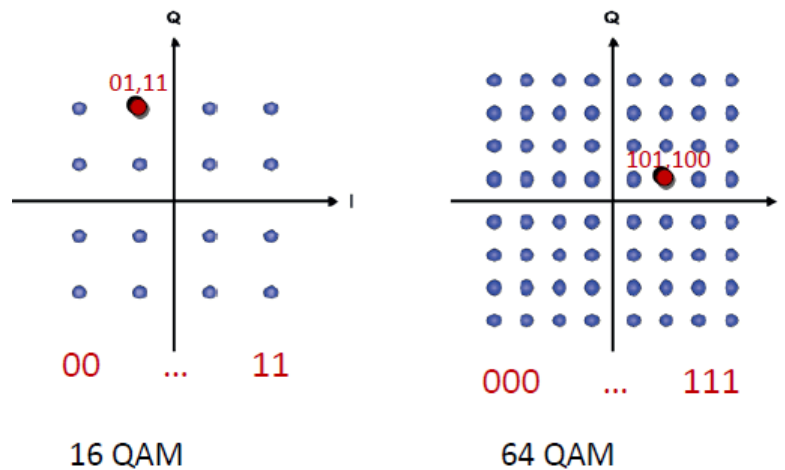


Figura 14 - Constelação 16-QAM e 64-QAM

Pode-se observar que o modo 64-QAM permite maiores taxas de transmissão, uma vez que cada símbolo transporta um maior número de bits. Contudo, a menor distância entre símbolos aumenta a probabilidade de ocorrência de erros.

No ADSL, os canais das subportadoras suportam entre 1 e 16 bits por símbolo, dependendo da atenuação da linha e do ruído, podendo cada canal ter diferentes ordens de modulação.

Aos canais com menor relação sinal-ruído (SNR) será atribuída uma constelação com menos pontos (símbolos) e aos canais com maior SNR será atribuída uma constelação com mais pontos que, apresentando maior número de bits/símbolo, permite maiores taxas de transmissão.

Como a relação sinal-ruído diminui ao longo da linha de cobre, facilmente se compreende que quanto maior for a distância do ponto de utilização final ao DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) menores serão as constelações M-QAM transmitidas por canal e conseqüentemente menor será a velocidade de acesso conseguida (Figura 15).

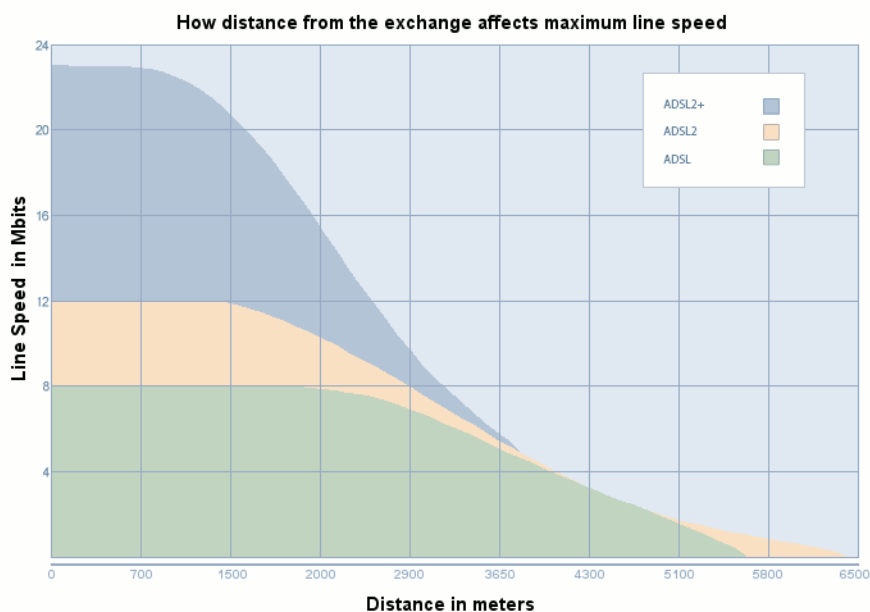


Figura 15 - Variação da taxa de transmissão (Mbps) com a distância (Km) ao DSLAM, para as 3 tecnologias ADSL mais comuns [11]

Note-se que as redes de clientes que distem mais de 2km do DSLAM não conseguem ser servidas com taxas de transmissão superiores a 8Mbps, exigindo naturalmente um compromisso distância versus taxa de transmissão

A crescente exigência por parte dos utilizadores, particularmente no que respeita à necessidade de maiores velocidades conduziu ao surgimento de dois padrões de evolução ADSL:

- **ADSL2** - Permite maiores débitos, adapta-se melhor às necessidades dos utilizadores no que respeita ao desempenho e interoperacionalidade e permite aos operadores estenderem a sua rede uma vez que aumenta o alcance (distância do DSLAM ao utilizador).
- **ADSL2+** - Apesar de ao duplicar a velocidade de transmissão, duplicando o espectro de utilização e de permitir a operação conjunta do ADSL e ADSL2 na mesma infraestrutura, reduz-se significativamente o alcance para aproximadamente 1Km.

A Tabela 1 mostra-nos a evolução da tecnologia ADSL no que concerne ao seu alcance (distância do utilizador final ao DSLAM) e os débitos conseguidos.

	Velocidade Máxima	Distância Ótima	Distância Máxima
ADSL	8 Mbps	< 2 Km	5,4 Km
ADSL2	12 Mbps	< 1,5 Km	5,4 Km
ADSL2+	24 Mbps	< 1Km	4 Km

Tabela 1 - Velocidades e distâncias das variantes ADSL

Note-se que o desenvolvimento da tecnologia ADSL evoluiu no sentido de proporcionar maiores velocidades em prejuízo do alcance.

Os constrangimentos mencionados obrigaram à procura de novas soluções, particularmente através da alteração do meio físico de transmissão de cobre para fibra óptica.

Actualmente existem redes xDSL cujo primeiro troço da rede de acesso é composta por armários alimentados por fibra óptica, reduz a centenas de metros a ligação de cobre entre estes e o utilizador, conseguindo débitos mais elevados.

As tecnologias DSL podem-se classificar de acordo com o modo de transmissão:

- **Simétricas** – As taxas de transmissão de *downstream* e *upstream* são iguais;
- **Assimétricas** – As taxas de transmissão de *downstream* e *upstream* são diferentes (tipicamente a taxa de *downstream* é maior);
- **Híbridas** – Capazes de operar nos dois modos;

3.1.2.1 HDSL (*High-Bit-Rate digital Subscriber Line*)

Esta tecnologia, desenvolvida prioritariamente para o segmento empresarial, foi a sucessora de uma outra IDSL que permitiu substituir o T1⁴ e o E1⁵ em pares entrelaçados de cobre,

⁴ Método de transmissão digital, particularmente utilizado nos EUA e Japão, capaz de multiplexar canais de voz num par de cobre.

permitindo transmissões simétricas. Para tal são utilizados dois ou quatro pares de cobre - dois pares T1 ou três E1, através dos quais e por modulação avançada se consegue utilizar menor largura de banda e transmitir em modo simétrico e bidireccional em linhas de cobre até um máximo de 5Km sem necessidade de repetidores de sinal.



Figura 16 – Arquitectura de rede utilizando a tecnologia HDSL [12]

O HDSL, apesar de possibilitar a utilização de toda a capacidade de transmissão sobre o cobre, apresenta duas desvantagens a considerar:

- Utilização de mais do que um par de cobre;
- Não permite a transmissão de voz sobre o mesmo troço;

⁵ Padrão Europeu criado pelo ITU-T, equivalente ao T-carrier apesar de funcionar com débitos diferentes. Um E1 possui um débito de 2Mbps

3.1.2.2 SHDSL (*Symmetric High-Speed Digital Subscriber Line*)

O SHDSL⁶ representa uma evolução da tecnologia HDSL com a vantagem de utilizar apenas um par de cobre para transmissão T1 ou E1, respondendo mais facilmente às adaptações das redes telefónicas tradicionais.

A maior diferença com a tecnologia precedente (HDSL) é ter transmissões simétricas em ambos os sentidos (*Downstream* e *Upstream*), complementada pelo facto de especificar um protocolo que permite negociar tipo de serviço e o seu ritmo durante a fase de arranque do sistema.

Refira-se que o facto de funcionar em simetria lhe confere alguma complementaridade relativamente ao ADSL.

3.1.2.3 VDSL (*Very High Data Rate Digital Subscriber Line*)

O VDSL amplia o conceito do ADSL e permite taxas de transmissão até 52Mbps para *downstream* e 2Mbps para *upstream*, para curtas distâncias até 300m de alcance, mantendo a simultaneidade voz e dados.

Estas taxas de transmissão, que se estenderam até aos 100Mbps - VDSL2 de acordo com a norma G.993.2 do ITU, constituem boas soluções para redes de banda larga e arquitecturas FTTC (*Fiber to the Curb*), possibilitando serviços de voz e dados e ainda TV de alta definição.

Estas tecnologias permitem a transmissão a taxas agregadas, simétricas e assimétricas de dezenas de Mbps, explorando as infra-estruturas da rede PSTN. Contrariamente ao serviço telefónico de voz que ocupa apenas 4KHz de banda, e de outras tecnologias DSL como o ADSL ou o HDSL que utilizam aproximadamente 1MHz, o VDSL utiliza 12MHz de largura de banda.

O DSLAM VDSL pode ser instalado a partir dos Central Office ou de nós intermédios mais próximo dos utilizadores com ligação em fibra óptica até às centrais, servindo assim como uma possível tecnologia de extensão de redes de fibra capazes de proporcionar, particularmente a empresas ou parques industriais, ligações de elevado débito.

⁶ SHDSL (Symmetric High Bit Rate Digital Subscriber Loop) [ITU-T G.991.2], também designada simplesmente SDSL (Single Line Digital Subscriber Line) [ETSI TS 101 524]

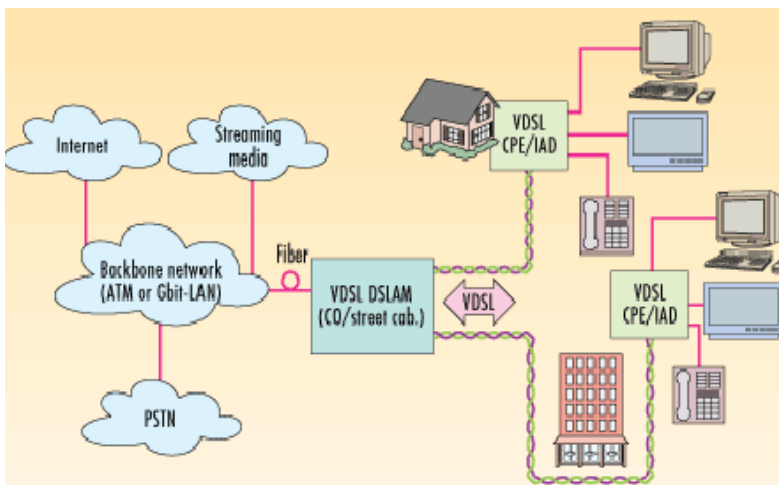


Figura 17 - Arquitetura de rede utilizando a tecnologia VDSL [13]

A Figura 17 mostra uma topologia VDSL, que não é mais do que uma arquitetura FTTN (*Fiber to the Node*). Os pares de cobre são utilizados para transporte de sinal até aos utilizadores, providenciando assim o acesso a voz, dados e vídeo. Este modelo tem a desvantagem de poder funcionar apenas para opções de curta distância do DSLAM VDSL.

3.1.3 G.Fast

O G.Fast é definido pela recomendação ITU-T G.9700. Esta recomendação especifica uma nova tecnologia de acesso à banda larga, explorando as infraestruturas de cobre existentes (Par de Cobre e Coaxial) e suportando débitos de 1Gbps, em condições específicas.

A implementação desta tecnologia requer a instalação de DPUs (*Distribution Point Unit*) que são ligados *Central Office* por fibra óptica e localizados muito perto do ponto de consumo final.

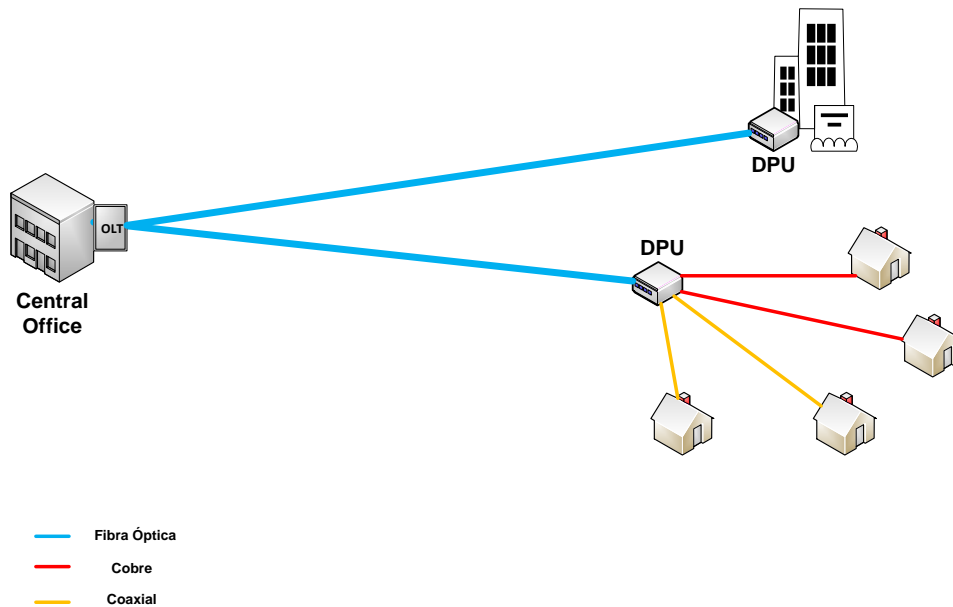


Figura 18 – Estrutura de uma rede de distribuição G.Fast

Uma das características desta tecnologia prende-se com o facto de os DPUs serem alimentados a partir das instalações do cliente.

O G.Fast representa uma boa oportunidade de fornecer maior largura de banda aos utilizadores sem a necessidade de grandes investimentos e de forma complementar às tecnologias DSL. Sedo o DSL mais adequado para distâncias mais longas e o G.Fast, exclusivamente para curtas distâncias (menores que 500m).

Em áreas urbanas densamente povoadas e em aglomerados residenciais de vários fogos ou em edifícios antigos onde exista dificuldade de instalar uma rede de fibra, quando exista uma rede em cobre de boa qualidade o G.Fast revela-se uma solução bastante eficiente.

Resumidamente, destacam-se algumas características do G:Fast:

- Velocidades até 1 Gbps
- Alcance inferior a 500m
- Modulação DMT (tal como nas tecnologias ADSL)
- A utilização do espectro de frequências de 2,2MHz até 106MHz ou 212MHz permite a coexistência com as tecnologias ADSL

3.1.4 Redes em Cabo Coaxial

As redes de Cabo Coaxial foram inicialmente utilizadas para efectuar *broadcast* do sinal (um só operador enviaria um único sinal para todos os utilizadores). Contudo a evolução do mercado das telecomunicações e a necessidade de captar quota de mercado obriga a que esta tecnologia seja capaz de fornecer simultaneamente dois serviços independentes e em simultâneo: Serviço de dados e VoIP.

Os serviços de dados obrigaram a que estas redes permitissem a comunicação bidireccional e independente para cada utilizador. Tal desiderato conduziu a técnicas de optimização da infraestrutura já instalada, através da utilização de gamas de frequência maiores.

À semelhança das redes DSL, as redes de cabo coaxial tem a vantagem em utilizar infra-estruturas pré-existentes, reduzindo os custos de implementação. A sua natureza apresenta no entanto a desvantagem da partilha da largura de banda disponível, sendo que a capacidade de suportar múltiplos utilizadores em simultâneo, produzindo fluxos de tráfego com características diferentes depende do número de utilizadores bem como do tráfego por eles gerado/solicitado

3.1.4.1 Redes CATV

As redes CATV têm a sua génese na necessidade de transmissão de sinais de televisão a longas distâncias. A televisão por cabo distribui um número elevado de canais de televisão que são agregados num nó central (*Head-End*), e distribuído pelos clientes através de uma rede de cabos coaxiais.

Nas redes CATV, a largura de banda é partilhada pelos utilizadores pelo que a simultaneidade no acesso reduz a largura de banda disponível para cada um, obrigando a que exista endereçamento para garantir que cada utilizador receba apenas o que lhe é destinado.

Tipicamente as redes de acesso CATV apresentam uma topologia em árvore coexistindo cabos coaxiais e fibra óptica. (Figura 19)

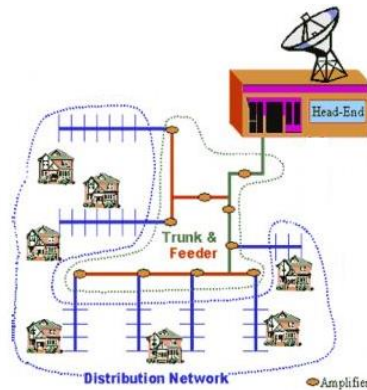


Figura 19 - Estrutura de uma Rede de Acesso CATV (adaptada de [14])

A rede de distribuição é uma rede em cabo coaxial que interliga com os diversos receptores ópticos, localizados nos nós de distribuição. Como as frequências de funcionamento são elevadas, obtém-se também elevadas atenuações que implicam a proliferação de amplificadores em intervalos de centenas de metros. Os cabos de fibra óptica são utilizados nos troços mais longos da rede a partir do Central Office onde está instalado o *Head-End* da rede.

3.1.4.2 Redes HFC

As redes HFC (*Hybrid Fiber Coax*) surgem como uma evolução das redes CATV face à necessidade de disponibilização de um conjunto alargado de serviços de telecomunicações para além da TV como seja o serviço telefónico ou o acesso à internet de alta velocidade.

A arquitectura das redes HFC compreende a utilização mista de cabos de fibra óptica na rede principal e de cabos coaxiais na rede de distribuição e na rede de acesso [15]. (Figura 20)

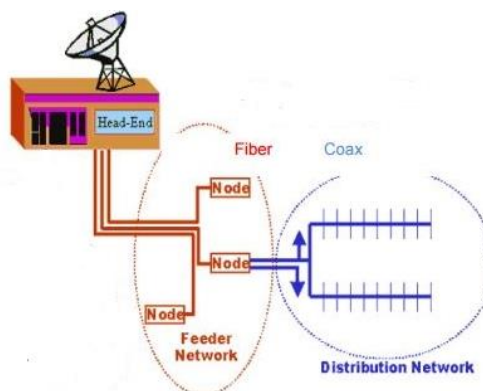


Figura 20 - Estrutura de uma rede de distribuição CATV (adaptada de [14])

Por forma a adaptar as redes HFC à crescente procura de serviços interactivos e portanto exigindo transmissão simétrica, o ITU-T adoptou o DOCSIS⁷ (*Data Over Cable Service Interface Specification*) que permite a interoperabilidade e o acesso ao serviço de dados. [16]

O DOCSIS é um sistema de comunicação ponto-multiponto que interliga o CMTS (*Cable Modem Termination System*) ao CM (*Cable Modem*) do cliente, proporcionando a transmissão de dados sobre HFC.

Tipicamente, a quantidade de informação enviada pelos utilizadores é muito inferior à informação recebida, pelo que a alocação do espectro de frequências definida pelas normas DOCSIS atribui uma largura de banda inferior para *upstream*, conforme se evidencia na Figura 21.

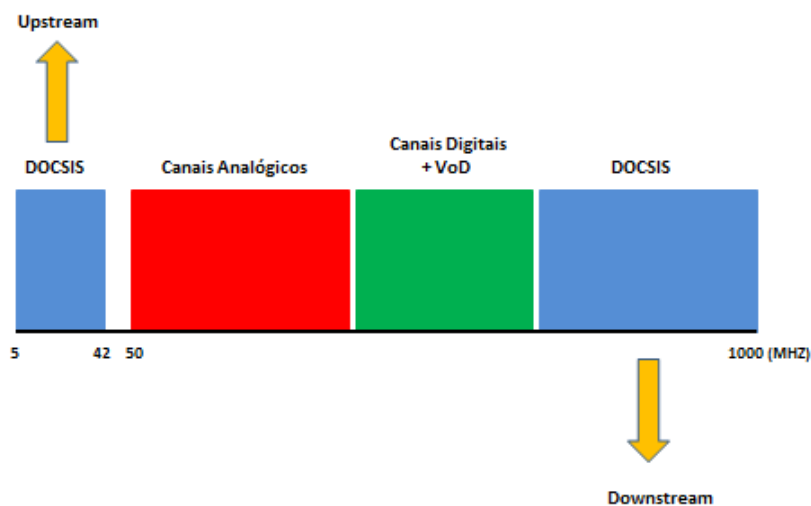


Figura 21 - Plano de Frequências de uma Rede DOCSIS

⁷ O DOCSIS 3.1 (Outubro 2013) suporta um conjunto de especificações e capacidades de pelo menos, 10Gbit/s para downstream e 1 Gbit/s para upstream.

3.2 Tecnologias Rádio na Rede de Acesso

O desenvolvimento das tecnologias Rádio na Rede de Acesso está fortemente ligado à dos sistemas celulares para fornecimento de serviços telefónicos. As redes móveis respondem assim à exigência de acesso à rede por parte dos utilizadores em mobilidade.

Existe aqui um traço comum com na génese destas redes com a das redes fixa, parte-se da rede telefónica para a posterior convergência com as redes de dados.

3.2.1 Redes Celulares

As redes celulares utilizam o princípio da reutilização de um canal (código, frequência, etc.). Numa rede celular a área de cobertura é dividida em regiões denominadas células, para que a potência transmitida seja baixa e as frequências disponíveis possam ser reutilizadas. Quando conexas, estas células permitem cobrir grandes áreas geográficas, proporcionar serviços a um elevado número de receptores portáteis (telemóveis, tabets, Pcs, etc) e facilitar, através de mecanismos adequados a mobilidade do utilizador.

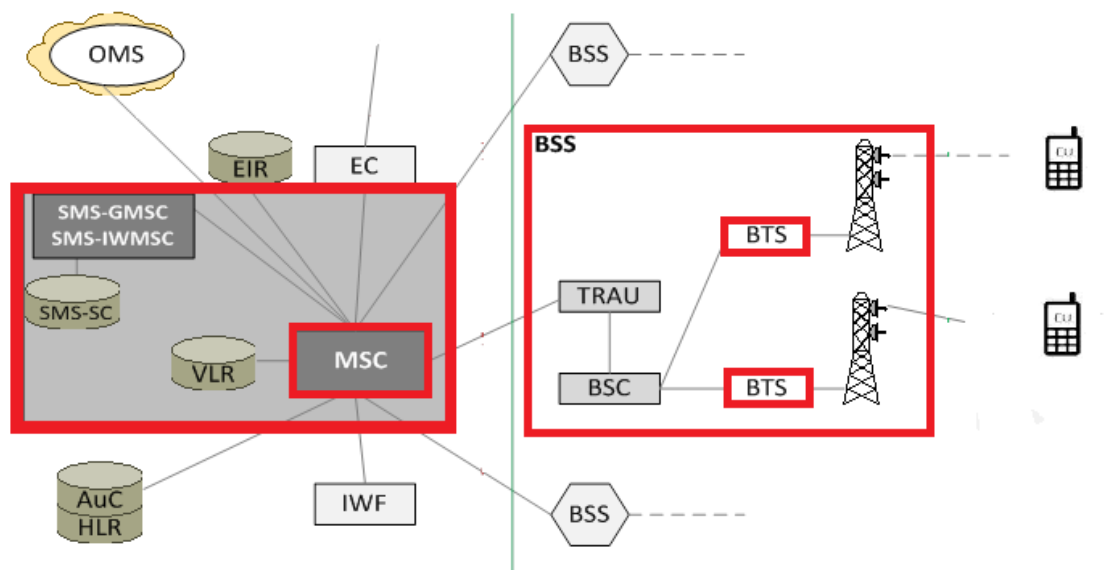


Figura 22 - Estrutura típica de uma rede celular GSM, (adaptada de [17])

Na Figura 22 podemos observar a estrutura típica de uma rede GSM. A título de exemplo descrevem-se os elementos básicos de uma rede GSM:

- **Terminal Móvel** – Fornece o interface ao utilizador para poder aceder aos serviços fornecidos pelo operador
 - **BSS (*Base Station Subsystem*)** – Corresponde à rede de acesso de um sistema GSM e providência ao utilizador a possibilidade de comutação de voz ou dados. Os seus nós interligam as BTS e a BSC (*Base Station Controller*).
 - **BSC (*Base Station Controller*)** – Responsável pelo controlo e gestão das BTS's, garantindo a qualidade e a potência transmitida pela BTS e pela alocação de um canal para comunicação durante a chamada.
 - **BTS (*Base Transceiver Station*)** – Faz o interface entre o Terminal Móvel e a Central de Comutação e Controle (MSC – *Mobile Switching Center*) Estes equipamentos definem cada célula da rede e é composta pela (i) antena ou *array* de antenas, (ii) filtros, (iii) *duplexers*, (iv) transmissores e receptores, (v) equipamento de transmissão e infra-estrutura física
- MSC (*Mobile Switching Center*)** – A Central de Comutação e Controle corresponde ao *core* de uma rede celular que permite a validação dos utilizadores e processamento de informação. É também responsável pela interligação aos diversos provedores de serviços para além da monitorização das Estações Base e gestão de mecanismos de *hand-off* que permitem a mobilidade do utilizador entre células.

3.2.1.1 Redes 2G (GSM/GPRS)

O GSM (*Global System for Mobile*), também designado por rede 2G (rede de segunda geração), corresponde à primeira tecnologia celular digital e foi o grande impulsionador para a massificação do serviço móvel, impulsionado pelo serviço de voz e SMS (*Small Messages.Service*).

Existem várias gamas de frequência utilizadas pelo padrão GSM, sendo o GSM 900 a mais utilizada. O GSM 900 utiliza dois conjuntos de frequências na banda dos 900MHz [18]:

- 890-915MHz para transmissões do terminal móvel (*uplink*)
- 935-969MHz para transmissão da rede (*downlink*)

A gestão de frequência é efectuada com recurso combinado de duas tecnologias: TDMA (*Time Division Multiple Acces*) e FDMA (*Frequency Division Multiple Access*).

Sucedaneamente o GPRS (*General Packet Radio Service*) veio introduzir a transmissão de dados por pacotes, funcionando em complementaridade com o GSM. A rede GPRS é interoperável com a grande maioria dos elementos de rede GSM coexistindo as duas redes de

forma paralela. O GSM assegura os serviços baseados em comutação de circuito e o GPRS faz o encaminhamento das ligações de pacotes.

3.2.1.2 Rede 3G (UMTS/HSPA)

A tecnologia 3G permite aos operadores oferecer vários serviços em simultâneo a débitos mais elevados e suportar um maior número de utilizadores de voz e dados o que é particularmente relevante em áreas urbanas.

A capacidade das redes 3G permite:

- Acesso à internet;
- Televisão móvel;
- Vídeo on demand;
- Vídeo conferência;
- Serviços de geolocalização;
- Serviços de telemedicina;

O padrão UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) foi proposto e desenvolvido como solução integrada de voz e dados para suceder à 2ª Geração de serviços móveis (2G), sendo a primeira tecnologia a proporcionar o uso efectivo de banda larga móvel. Os trabalhos de normalização do padrão UMTS foram realizados pela *Third Generation Partnership Project* (3GPP)

As taxas de transmissão UMTS são da ordem dos 2Mbps, possíveis pelo recurso à modulação W-CDMA (*Wide-Band Code-Division Multiple Access*) ou CDMA (*Code-Division Multiple Access*) [19].

Um sistema UMTS pode ser implementado, tendo por base um sistema de comunicações móveis já existente. Nestas circunstâncias o equipamento rádio poderá acomodar diversas tecnologias como o GSM, o GPRS e o UMTS em simultâneo. Esta característica facilita a migração do 2G para a 3G.

A tecnologia HSPA (*High Speed Packet Access*) surge como evolução do padrão UMTS:

- Aumenta a velocidade de transmissão de dados através da inclusão dos canais HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) que permite 14,4Mbps para *downlink*, através de um sistema de modulação e codificação adaptativas utilizando constelações de 16-QAM e 64-QAM, e do canal HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) para *uplink*.
- Melhora a ligação entre as redes móveis 3G e os serviços de internet, permitindo o acesso de banda larga a vários utilizadores servidos pela mesma célula.

3.2.1.3 Redes 4G (LTE e Wimax)

3.2.1.3.1 LTE

O grande atractivo das Redes 4G são a convergência de um alargado leque de serviços até aqui apenas disponível pelas redes de banda larga fixas.

O LTE (*Long Term Evolution*) é o padrão normalizado pela versão 8 de 3GPP, surgindo da necessidade de assegurar a competitividade alcançada pela tecnologia 3G assume as seguintes motivações [19]:

- Proporcionar velocidades até 100Mbps de *Downlink* e 50 Mbps de *Uplink*;
- Proporcionar a optimizado para comutação de pacotes;
- Reduzir a latência;
- Diminuir a complexidade da rede;
- Reduzir o investimento necessário para a implementação da rede e nos custos operacionais
- Evitar a fragmentação desnecessária de sistemas através da agregação de canais com a mesma frequência de operação. O LTE opera às mesmas frequências do UMTS com largura de banda variável de 20MHz;
- Melhorar a eficiência espectral utilizando a técnicas de modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*)

Importa referir a existência de duas implementações possíveis [18]:

- Rede exclusiva LTE – Implementada para transporte de dados. Recorrendo a técnicas de VoIP (*Voice over IP*) para tráfego de voz. Esta implementação simplificada liga directamente os NósB à rede nuclear;
- O LTE sobre GSM – Implementado sobre a infraestrutura GSM existente que, através da actualização de alguns elementos permite manter a rede GSM activa e utiliza-la para encaminhar o tráfego de voz.

Apesar de referir o LTE como uma tecnologia 4G existe alguma controvérsia quanto a este facto pois as suas características não cumprem integralmente os requisitos exigidos pelo protocolo IMT *Advanced* (*International Mobile Telecommunications Advanced*). O LTE *Advanced*, surge assim como evolução do LTE e normalizado pelo 3GPP, cumprindo já todos os requisitos exigidos para ser considerado uma tecnologia 4G.

Da evolução do LTE para o LTE Advanced, destaca-se:

- A agregação de portadoras, permitindo que o utilizador possa receber várias frequências em simultâneo;
- Introdução de mecanismos de transmissão/recepção multiponto entre os nós da rede CoMP (*Coordinated multipoint transmission/reception*);
- Coordenação de interferências avançadas, ICIC (*Inter-cell interference coordination*) no suporte a redes heterogéneas, minimizando interferências e colisões entre redes celulares;

Estas melhorias do LTE Advanced, traduzem-se num rendimento de rede superior ao proporcionado pelo LTE.

3.2.1.3.2 Wimax

Wimax é uma tecnologia sem fios definida segundo a norma IEEE 802.16, como alternativa às redes DSL e de cabo coaxial para acesso à internet. Esta tecnologia suporta velocidades de transmissão até 40Mbit/s e apresenta um alcance até 10Km. No entanto a largura de banda é partilhada pelos utilizadores que estiverem simultaneamente ligados à rede.

As redes Wimax representam uma boa solução no que respeita à mobilidade e flexibilidade. Contudo, o facto de não permitirem o fornecimento de serviços a longas distâncias dificulta a sua competição com as redes de cobre. Ainda assim, representam uma solução alternativa para cobrir pequenas áreas remotas e rurais.

3.3 Tecnologias de Fibra Óptica na Rede de Acesso

Desde o início dos anos 80 do século passado que as redes de telecomunicações passaram a utilizar cabos de fibra óptica. Numa primeira fase este novo meio de transmissão surge como resposta á necessidade de vencer longas distâncias e portanto utilizada em Redes Core e nas ligações transatlânticas. Contudo, hoje em dia ela é uma realidade também nas redes de acesso e na transmissão de dados [2].

A crescente procura de serviços de comunicações e o conseqüente aumento de tráfego aliado á necessidade de maior largura de banda, ou as novas exigências de velocidade (para além do imperativo de vencer longas distâncias) intensificou o processo de migração das infra-estruturas de cobre para fibra óptica que previsivelmente representam uma solução de longo prazo capaz de responder às necessidades de procura por parte dos utilizadores que compõem os diferentes segmentos de mercado.

São enormes as vantagens decorrentes da utilização da fibra óptica:

- Disponibiliza uma largura de banda muito superior à conseguida por meio do cobre;
- Tem menor susceptibilidade a interferências eléctricas;
- Tem reduzida atenuação e dispersão permitindo grandes distâncias entre repetidores, devido à elevada largura de banda que proporciona;
- Utiliza cabos de dimensão mais reduzida e menor peso (quando comparado com os cabos de cobre), facilitando a instalação e operação nas infra-estruturas;
- Tem resistência à corrosão e influência de campos magnéticos quando comparado com cabos coaxiais ou pares de cobre.

4. Migração de redes ADSL para FTTx

As redes de acesso são actualmente um dos segmentos com maior importância estratégica para os operadores:

- Influência a oferta de novos serviços e a respectiva qualidade;
- Condiciona a capacidade de convergência fixo-móvel;

Importa, portanto, estudar estratégias de modernização destas redes que, permitindo uma evolução não disruptiva em relação aos investimentos que estão efectuados, abram a possibilidade de introdução de novas soluções tecnológicas.

Para se compreender melhor esta problemática importa ter em conta os seguintes aspectos:

- A rede telefónica criada para permitir a comunicação de voz (*Plain Old Telephone Service – POTS*) sobre pares de cobre entrelaçados é uma das infra-estruturas com maior grau de cobertura a nível global. Nalguns países é mesmo mais densa que a rede distribuição de energia eléctrica. Apesar do seu tempo de vida ter sido consideravelmente alargado com a introdução de tecnologias DSL a respectiva capacidade está hoje perto do seu limite técnico em condições economicamente viáveis.
- Ainda assim, o legado da rede telefónica (valas, condutas, cabos, postes, caixas de visita, pontos de derivação, edifícios, etc) tem um elevado valor que importa rentabilizar.

A necessidade de fornecer serviços de dados, adicionalmente ao tradicional serviço de voz, constituiu o primeiro desafio para a evolução das redes PSTN.

As redes DSL apresentam a vantagem de prolongar a vida das redes de cobre existentes, permitindo uma considerável redução de custos na sua implementação e capaz de providenciar a largura de banda necessária para a utilização simultânea de serviços e aplicações como VoIP ou IPTV e o comum acesso á internet.

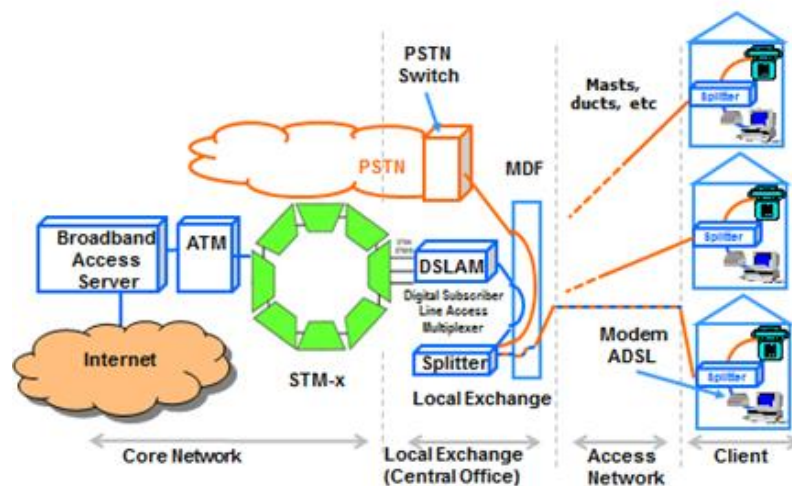


Figura 23 - Estrutura típica de uma rede de cobre com ADSL [5]

A arquitectura base das tecnologias xDSL, representada na Figura 23, constitui uma evolução da tradicional rede telefónica da Figura 8. Mantendo em larga escala toda a estrutura física de rede permitiu-se, pela reutilização da parte superior do espectro de cobre, o acesso a débitos elevados e a redução da carga sobre a rede PSTN.

No *Central Office*, um *splitter* faz a separação do tráfego de voz e dados. O tráfego telefónico é reencaminhado para a rede PSTN e os dados para o DSLAM. O DSLAM liga-se ao BRAS através da rede de transporte, tipicamente ATM ou Ethernet.

Do ponto de vista do operador a implantação do ADSL tem a vantagem de não exigir alterações na estrutura física da rede de cobre legada. Contudo as novas exigências de compromisso largura de banda versus velocidade ou ainda a qualidade de serviço versus distância ditaram o afastamento das redes de cobre em detrimento das redes de fibra óptica.

4.1 Fibra Óptica nas Redes Acesso

As redes de fibra óptica são hoje uma exigência dos mercados de telecomunicações pois permitem alcançar maiores velocidades de transmissão que o cobre e não requerem elementos regenerativos (activos, portanto) entre o *central office* e o utilizador. Tal, permite olhar as redes de fibra óptica com elevado potencial de investimento particularmente devido à sua enorme escalabilidade.

No início dos anos noventa, surge a geração de redes ópticas que se destacam com o surgimento do SDH e com a utilização do encaminhamento por comprimento de onda. O surgimento destes componentes permitiu a viabilização comercial deste tipo de redes, reduzindo drasticamente o seu custo. Esta alavanca tecnológica teve como motivação primeira as vantagens económicas no encaminhamento por comutação de conexões de elevada

capacidade no domínio óptico em virtude do domínio eléctrico. Simultaneamente, foram desenvolvidas funcionalidades capazes de flexibilizar e facilitar a operação na rede, dotando-a de mecanismos simplificados para estabelecimento e remoção de encaminhamentos ópticos.

Estas funcionalidades contribuíram decisivamente para o surgimento de redes ópticas inteligentes em topologias de anel e malha, disponibilizando caminhos ópticos a pedido e com capacidade de *roll back* para lidar com possíveis avarias em determinados troços de rede.

A evolução do processo de fabrico e a conseqüente redução do seu custo, permitiu que as tecnologias ópticas se aproximassem cada vez mais dos pontos de consumo final.

A evolução das redes de acesso apresenta várias soluções ou configurações, podendo ser faseada, iniciando-se pela redução do comprimento dos nós em par de cobre (ligando-os a pontos de acesso secundários mais próximos do cliente final, onde são instalados DSLAMs, os quais, por sua vez, são ligados à central do operador através de fibra óptica), e evoluindo para soluções onde o lacete poderá ser constituído totalmente em fibra óptica. [20]

As redes baseadas na utilização de fibra óptica adoptam o termo genérico FTTx (Fiber to the x). Este conceito surge da necessidade de categorizar a rede em função da aproximação da fibra óptica até ao utilizador final. Mais concretamente pela localização na rede o equipamento terminal óptico (OLT).

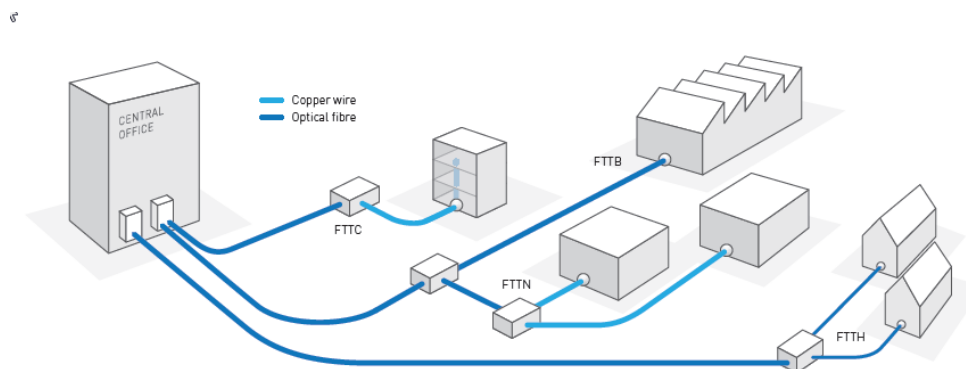


Figura 24 – Redes FTTx [21]

A Figura 24 permite observar as diferentes Redes FTTx, distinguindo os meios de transmissão, fibra óptica e cobre. A evolução da topologia faz-se no sentido de aproximar a fibra ao utilizador final, potenciando o alcance da fibra. Esta evolução está condicionada pela disponibilidade dos operadores face às perspectivas de retorno de investimento.

Decorrente do alcance da fibra na rede, adopta-se a seguinte terminologia:

- FTTN / FTTCab (*Fiber to the Node / Fiber to the Cabinet*) – Define as redes em que a fibra óptica termina nos armários de rua. A partir desse ponto os utilizadores são servidos pela rede de existente, cobre ou cabo coaxial. Estas redes têm maior

aplicação em pequenos aglomerados (raio máximo de 1500m) em que os utilizadores pretendam acesso à internet de elevada velocidade.

No armário de rua, a ONU fornece os interfaces para as tecnologias de cobre POTS, ADSL, VDSL e HDSL que permitem ao utilizador o acesso aos diversos serviços de banda larga.

Nos casos em que a ligação ao utilizador é feita por cabo coaxial é utilizado o protocolo DOCSIS. As taxas de transmissão em qualquer dos casos dependerá da tecnologia utilizada e da sua distância ao ONU.

- FTTC (*Fiber to the Curb*) – Designa a rede em que a fibra óptica chega até a um armário de rua, onde existe uma ONU. Distingue-se da FTTN pelo alcance da fibra, servindo assim uma pequena área, de raio não superior a 300m [2].
Nestas redes a ONU está localizada no passeio (*curb*), podendo servir um ou mais edifícios através dos seus interfaces POTS e VDSL ou DOCSIS, tal como descrito para as redes FTTN/FTTCab e com os mesmos pressupostos no que concerne a taxas de transmissão.
- FTTB (*Fiber to the Building*) – Define a rede onde a fibra chega à entrada do edifício residencial ou empresarial. Nesta situação, a ligação ao utilizador é efectuada por outro meio físico que não a fibra.
Nestes cenários é frequente ligar uma LAN ao ONU através de cabos de rede UTP-5, ressalvando a necessidade de estes cabos não terem mais de 100m, ou alternativamente providenciando uma rede sem fios. Esta rede representa uma boa solução para edifícios com elevada densidade de utilizadores exigindo grandes requisitos de largura de banda.
- FTTH (*Fiber to the Home*) – Nesta rede a fibra óptica chega directamente ao utilizador final, numa solução dedicada em que o utilizador é servido exclusivamente por uma rede de fibra, necessitando apenas de converter o sinal óptico em sinal eléctrico na residência ou edifício empresarial do utilizador. Em contraste com as redes descritas anteriormente, uma rede FTTH não utiliza nenhum troço de rede de cobre existente, podendo no entanto aproveitar a rede de condutas do operador.
Este cenário serve o utilizador através de um ONT, ligado à rede por uma única fibra fornecendo os interfaces POTS, GE e FE.
Esta solução, sendo a mais dispendiosa para os operadores oferece o melhor acesso ao utilizador.

4.2 Arquitecturas e Tecnologias da Rede de Acesso Óptica

O segmento óptico de uma Rede de Acesso pode apresentar dois tipos de arquitectura, como ilustra a Figura 25.

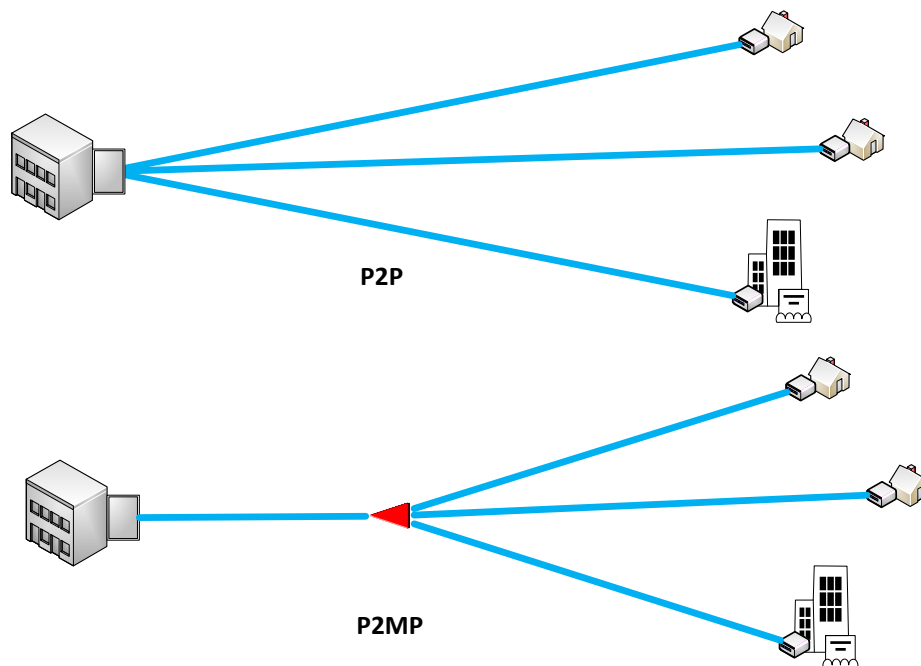


Figura 25 - Arquitecturas de Rede Ponto-a-Ponto (P2P) e Ponto-Multiponto (P2MP).

- **Ponto-a-ponto** – Conceptualmente, corresponde ao modelo mais simples. Esta arquitectura dedica uma fibra a cada cliente, sendo a largura de banda disponibilizada pela OLT (para essa fibra) integralmente atribuída a um único cliente. Esta arquitectura, fornece um acesso dedicado a cada cliente, aumenta a segurança e permite débitos mais elevados. Qualquer mudança de serviços que implique alteração de débitos fornecidos obriga apenas a mexidas nos equipamentos terminais (OLT ou ONT) sem qualquer alteração na infra-estrutura óptica. Do ponto de vista do operador esta arquitectura representa um maior investimento inicial na instalação da rede, exigindo conseqüentemente uma maior ocupação de espaço, além de aumentar significativamente o consumo de energia (pois teremos um laser emissor por cada cliente).
- **Ponto-multiponto** – Esta arquitectura pode ser subdividida de acordo com as suas características de transmissão em dois tipos:

- i. Rede Óptica Activa (AON) – Requer de equipamentos activos (*Switches, Routers ou Multiplexers*) e naturalmente alimentação eléctrica nos pontos de distribuição.
- ii. Rede Óptica Passiva (PON) – Não exige nenhum elemento activo e nos pontos de derivação recorre a *splitters* ópticos passivos, no caso da TDM-PON e repartidor/combinador para WDM-PON)

Esta categorização permite agrupar as arquitecturas FTTCab (cujo conceito pode ser alargado às redes HFC), FTTN/FTTC como tecnologias activas e as arquitecturas FTTB e FTTH, também designadas FTTP (Fiber to the Premises), como tecnologias passivas.

A escolha da solução tecnológica de rede a implementar implica a análise de vários factores:

- Necessidades do utilizador
- Serviços a disponibilizar
- Custo das infra-estruturas
- Infra-estruturas pré-existente
- Local de acesso a servir
- Capacidade da rede
- Facilidade de migração de tecnologia

4.3 Redes Ópticas Passivas

A designação de Redes Ópticas Passivas deve-se ao facto de nenhum dos elementos de rede, desde o CO até ao utilizador requerer qualquer fonte de alimentação. Contudo as tecnologias mais recentes admitem alguns amplificadores de sinal neste troço da rede, mantendo historicamente a mesma designação.

Na sua configuração mais elementar as redes ópticas passivas (PONs) são constituídas por quatro elementos fundamentais [22]:

- Nós de Acesso Metro (MANs), onde se agregam dados e respectivas rotas que servem os milhares de subscritores entre cidades;
- Central Office (COs), onde residem os equipamentos de transmissão e recepção capazes de fornecer serviço aos milhares de subscritores;
- Splitters, capazes de proporcionar que uma única fibra saia do CO para fornecer serviço a dezenas de subscritores;
- Customer premise cliente (CPE), equipamento necessário para que o utilizador possa aceder ao serviço contratado com o operador;

A interligação deste conjunto de elementos de rede faz-se através de cabos de fibra óptica de diferentes dimensões consoante a necessidade e atendendo aos elementos de rede que interligam. Sendo frequente encontrar na literatura a designação expressa na Tabela 2.

Descrição da Ligação	Ligação
CO - Splitter	Feeder
Splitter - Splitter	Distribution
Splitter - Subscriber	Drop

Tabela 2 - Nomenclatura das ligações em fibra

Uma rede PON é uma rede óptica passiva com arquitectura ponto – multiponto que consiste na interligação de equipamentos denominados OLT (*Optical Line Termination*), localizados nas extremidades da rede de transporte e ONT (*Optical Network Termination*) situados do lado do cliente. Estes dois equipamentos são os únicos elementos não passivos da rede, não existindo necessidade de qualquer tipo de alimentação em toda a rede.

A Figura 26 representa um exemplo típico de uma rede PON, onde se ilustra um estágio de *splitagem*, derivado de uma única fibra saída do CO. Cada ponto de distribuição pode conter diversos divisores ópticos na mesma fibra, originando divisões de 4, 8, 16, 32, 64 ou 128 fibras para a saída, dependente do modo de fabrico do divisor óptico [20].

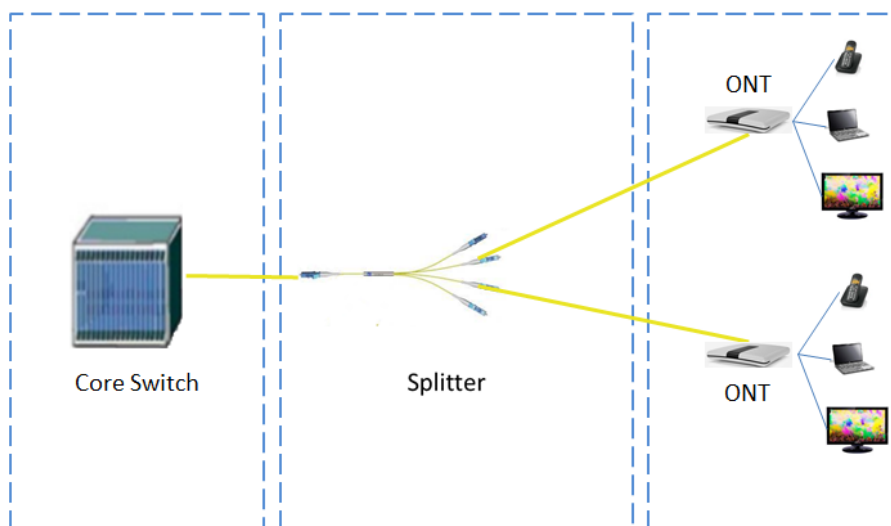


Figura 26 - Estrutura de uma rede PON

O sinal óptico é assim transmitido por uma única fibra da OLT que interliga com os ONT's através de divisores ópticos passivos, responsáveis pela múltipla utilização de uma única fibra. Nos nós remotos o sinal eléctrico é comutado para o destino através de conversões óptico-eléctrico-óptico, em equipamentos como switches ou multiplexers, também responsáveis pela agregação da fibra de acesso.

As redes PON apresentam três vantagens a considerar:

- O facto de não exigir elementos activos nas redes de acesso, permite ao operador reduzir custos energéticos, fora do CO.
- A possibilidade de partilhar cada porto de uma OLT com vários clientes, minimizando custos de implementação, reduzindo o espaço necessário no CO e reduzindo custos energéticos (1 laser emissor para N clientes).
- Esta arquitectura tem por base a tecnologia Ethernet que beneficiando de uma estrutura de rede simplificada permite enorme flexibilidade e facilidade de ampliações futuras.

Não menosprezável é ainda o seu alcance, ao permitir que o cliente esteja afastado até um máximo 80Km do CO.

Estes factores têm sido fundamentais para que esta seja a solução preferencial dos operadores.

Como as ONT partilham a mesma fibra e o mesmo porto do OLT é necessário recorrer a técnicas de acesso múltiplo para evitar colisões na comunicação. Assim podemos definir dois tipos de redes PON com base na sua técnica de multiplexagem:

- **TDM-PON** – É actualmente a técnica de multiplexagem mais utilizada [23], sendo os vários sinais são multiplexados no domínio do tempo, garantindo a transmissão de informação através de uma única fibra (canal de comunicação). Ou seja, os blocos de informação partilham o mesmo canal, intercalados no tempo.
Através de um esquema de difusão os dados são enviados a todos os destinatários, separados em diferentes *time-slots* em que cada um deles apenas tem acesso á informação que lhe é devida, por inclusão de um campo de identificação no cabeçalho do pacote ou pela localização do *time slot* na trama de dados.
Esta técnica é adequada, desde que a exigência de largura de banda dos diversos utilizadores que partilhem a PON não se torne demasiado grande.
- **WDM-PON** –.A técnica de multiplexagem por comprimento de onda tem-se imposto como solução para incrementar a capacidade das redes ópticas sem que isso implique grandes alterações estruturais.

Permitindo o transporte de vários comprimentos de onda numa única fibra, a ligação aos utilizadores finais, aos quais se disponibiliza um determinado λ (comprimento de onda) torna que estas ligações se tornem virtualmente ponto-a-ponto, reduzindo os problemas de partilha de canal, particularmente ao nível da segurança.

Por forma a viabilizar e traduzir em oferta de serviço aos utilizadores estas soluções tecnológicas foram estabelecidos padrões para as tecnologias PON. Saliente-se contudo que as diferenças entre eles ocorrem apenas nas especificações e nas camadas de protocolo, sendo comum a tecnologia geral.

Os padrões TDM-PON mais utilizados são:

- **APON** – ATM PON (ITU-T G.983): É a primeira norma das tecnologias PON. Definida para responder a soluções empresariais, utiliza o protocolo ATM, permite alcances de 20KM e débitos de 622Mbps(*downstream*)/155Mbps(*upstream*)
- **BPON** – BroadBand PON (ITU G.983.1 Recommendations): Esta tecnologia é uma evolução da APON e permite a alocação de largura de banda para upstream, através do mecanismo DBA (Dynamic Band Allocation). A introdução do DBA permite a atribuição de prioridades no acesso á largura de banda por parte dos clientes, dependente dos serviços contratualizados com o operador.
- **EPON** – Ethernet PON (IEEE Standard 802.3ah): É um standard do IEEE que se caracteriza por transportar de forma nativa o tráfego Ethernet em vez do tradicional ATM.
- **GPON** – Gigabit PON (ITU-T G.984): É uma evolução do BPON com o propósito de melhorar o tráfego IP e ATM através da inclusão de células de tamanho variável. Esta fragmentação de pacotes aumenta a qualidade de serviço em tráfego sensível a atrasos (voz e vídeo) e implementa ainda técnicas de encriptação elevando a preocupação ao nível da segurança.

4.3.1 GPON

A GPON surge como evolução da BPON com o propósito principal de transmitir pacotes variáveis a taxas de Gbit/s. Para tal o grupo FSAN deu início ao seu desenvolvimento em 2001, tendo sido padronizada pela norma ITU-T G.984 em 2003.

As redes GPON são actualmente a solução PON mais utilizada pelos operadores Europeus e Norte Americanos. O sucesso desta tecnologia deve-se a vários factores [15] [16] [24]:

- Suporta um vasto leque de aplicações e serviços;
- Suporta taxas de transmissão elevadas, sendo as mais comuns: (i) 1,2Gbit/s no sentido *upstream*, (ii) 2,4Gbit/s no sentido *downstream*;
- Permite a transmissão unidireccional de vídeo e TV (unicast e broadcast);
- Admite elevada flexibilidade ao nível da sua arquitectura de rede. Combinando, por exemplo, com outras tecnologias como o VDSL2 (VDSL2+FTTC) ou com acessos FTTH;
- Permite de forma adequada suportar o *backhaul* das redes móveis. Os serviços de voz e dados convergem, permitindo o transporte de múltiplos serviços na sua forma nativa, TDM;
- Permite uma cobertura de longo alcance (20km) e reduz os nós da rede, diminuindo os custos de investimento e das despesas operacionais.
- Admite a fragmentação de pacotes de tamanho variável, aumentando a eficiência do meio de transporte e permitindo a escolha do protocolo. (i) IP sobre Fast, Gigabit ou 10Gbit Ethernet, (ii) TDM sobre interfaces SDH, (iii) ATM entre 155-622Mbps.
- Reforça os mecanismos de segurança através de várias técnicas de encriptação, particularmente AES (*Advanced Encryption Standard*).
- Permite suportar os serviços da rede legada, actuais e futuros. Tal é possível pelo recurso ao método de encapsulamento GEM (*GPON Encapsulation*) que fornece comunicação orientada à ligação [20].

GPON disponibiliza serviços de IPTV e CATV. O IPTV oferece serviço de vídeo baseado em *multicast* IP, ou seja, diferentes programas são configurados com diferentes endereços *multicast* e chegam ao ONT do cliente através de uma série de servidores *broadcast*. A CATV é possível em redes GPON, através da conversão eléctrico-óptica o fluxo de vídeo é convertido numa onda óptica no OLT e adicionada a outras ondas ópticas, com comprimentos de onda diferentes (os sinais de vídeo RF utilizam um comprimento de onda de 1550nm). As ondas ópticas são transmitidas através da fibra até chegarem aos ONT's, onde os sinais de vídeo são separados para fornecer o serviço de vídeo. [2].

A Figura 27 apresenta o modelo de referência de uma rede GPON:

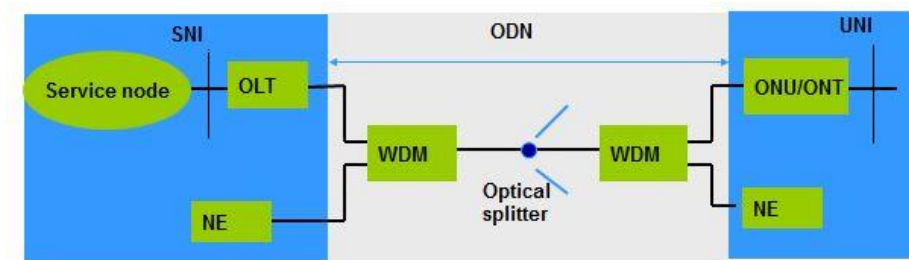


Figura 27 - Modelo de referência GPON [25]

4.3.1.1 Princípio de funcionamento

Ao nível da camada física, a fibra óptica é intrinsecamente multi-serviço, o que permite ao modelo GPON separar em diferentes comprimentos de onda dados e vídeo, evitando a disputa de largura de banda entre dados.

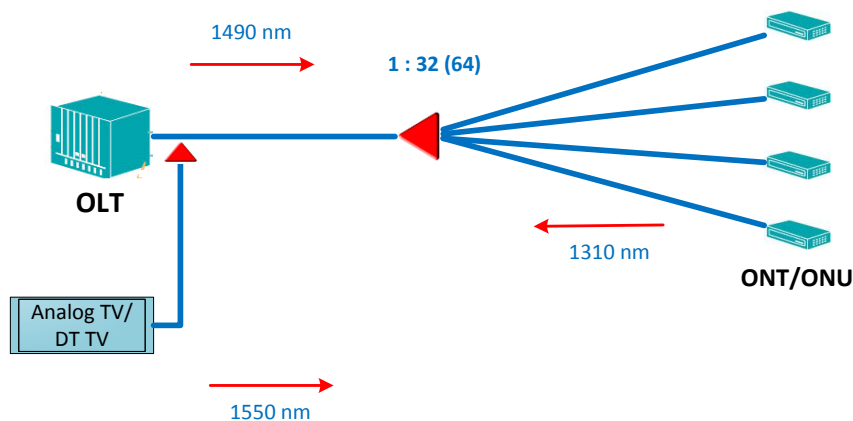


Figura 28 – Topologia GPON [25]

Nas redes GPON coexistem três fluxos de informação com comprimento de onda distinto:

- Downstream de dados: Comprimento de onda 1490nm, *link budget* 28db e taxa de transferência 2,4 Gbit/s;
- Downstream de vídeo RF: Comprimento de onda 1550nm;
- Upstream: Comprimento de onda 1310nm, *link budget* 28db e taxa de transferência 1,2 Gbit/s

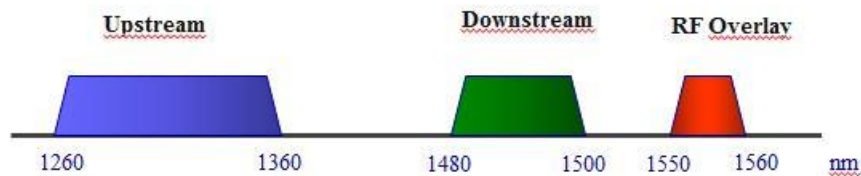


Figura 29 – Comprimentos de onda numa rede GPON

O sistema de transmissão para *downstream* tem por base a tecnologia TDM (*Time Division Multiplex*). O sinal enviado pela OLT, disporá de um período de tempo dedicado para que a informação possa ser transmitida. Este sinal, emitido em *broadcast* percorrerá a rede de distribuição óptica (ODN – *Optical Distribution Network*) e chegará a todas as ONT's da PON. Cada ONT, identifica e separa o tráfego (*time slots*) que lhe é destinado, descartando os restantes. Os dados são encriptados para que cada utilizador tenha apenas acesso à sua informação requerida.

Existem mecanismos de QoS que permitem aos operadores dividir por classes de serviço os diferentes utilizadores, conferindo-lhe prioridade no acesso ou atribuir-lhe maior largura de banda.

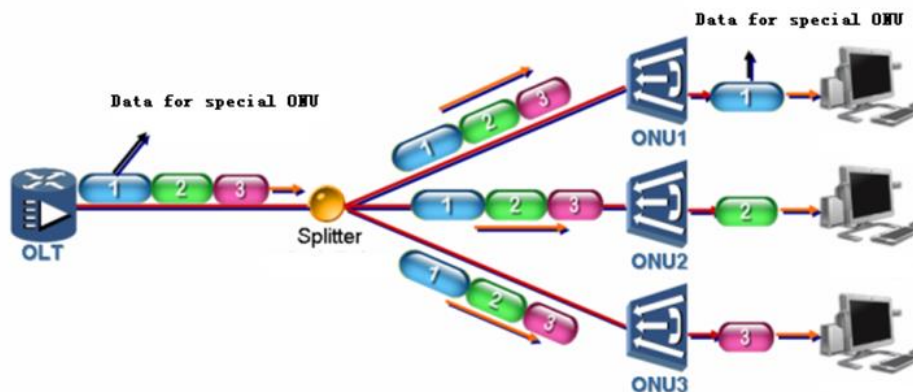


Figura 30 - Canal de comunicação downstream baseado em TDM [26]

O sistema de comunicação em *upstream* está suportado pela tecnologia TDMA (*Time Division Multiple Access*). O tráfego oriundo de cada utilizador é enviado para a OLT a partir de cada ONT que tem o seu próprio transmissor óptico.

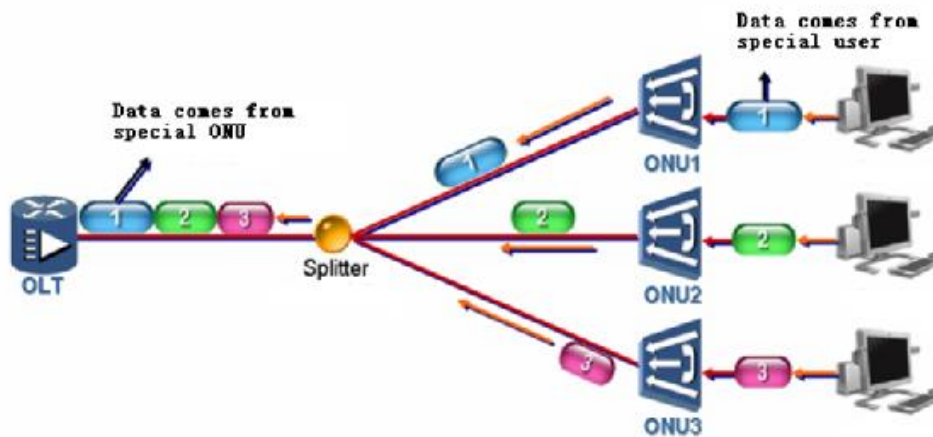


Figura 31 - Canal de comunicação upstream baseado em TDMA [26]

O tráfego de TDMA é controlado pela OLT que atribui períodos de tempo variável a cada ONT para que estes enviem o seu tráfego em rajada. Este controlo é proporcionado pelo algoritmo DBA (*Dynamic Band Allocation*), responsável pela alocação de largura de banda a montante da ONT, existindo mecanismos para evitar colisões de pacotes no canal de comunicação partilhado.

O algoritmo DBA retira proveito dos atributos das redes partilhadas:

- Os utilizadores da PON não estão simultaneamente ligados à rede;
- Mesmo quando ligados em simultâneo, não transmitem em simultâneo;
- A maioria do tráfego é enviada em rajadas, existindo lacunas entre pacotes que podem ser preenchidos por tráfego de outro utilizador.

Para determinar a quantidade de tráfego a atribuir a cada ONT, a OLT precisa saber o estado do T-CONT (*Transmission Container*) associado à ONT. Este indica a quantidade de informação que está no *buffer* à espera de ser enviada. O estado da cada T-CONT influencia não só a atribuição da largura de banda, como a prioridade e a qualidade de serviço (QoS) e o número de *time slots* a atribuir a cada ONT. Desta forma cada OLT conseguirá alocar individualmente, no respeito pelas limitações existentes, a largura de banda necessária. [15].

4.3.2 Evolução da Tecnologia PON

O crescente aumento do consumo de dados pelos utilizadores de serviços de banda larga, fixo e móvel, tem alavancado o crescimento das redes ópticas passivas, sendo actualmente uma das prioridades de investimento para os operadores.

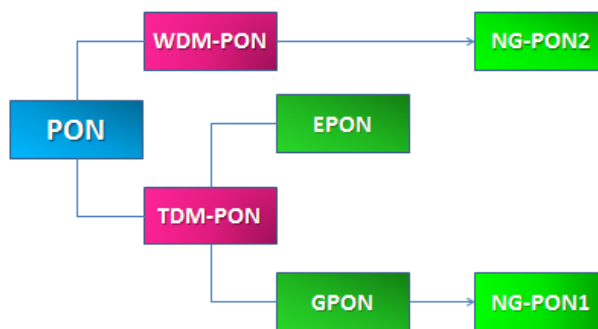


Figura 32 - Evolução das tecnologias PON

O sucesso das tecnologias PON nas Redes de Acesso sofreu um enorme impulso de popularidade com o desenvolvimento da tecnologia GPON – Atractivas pela simplicidade e pelas elevadas taxas de transmissão conseguidas.

Actualmente, as soluções para Redes Ópticas de Acesso tendem para alternativas capazes de proporcionar maiores larguras de banda. Apesar da largura de banda disponibilizada actualmente ser ainda suficiente para satisfazer as necessidades e para fornecer os serviços existentes. Contudo, não se afigura fácil prever até quando será suficiente.

A tendência de mudança para as redes ópticas de nova geração tem subjacente a protecção de investimentos efectuados. O investimento inicial nas redes PON é significativo, pelo que as redes de distribuição ópticas legadas são essenciais para os operadores.

A coexistência com os sistemas GPON legados e a reutilização do ODN são requisitos fundamentais para a evolução destas duas tecnologias. Note-se que o ODN representa 70% do custo de implementação de uma PON. Pelo que se compreende facilmente a exigência de compatibilidade com as redes ópticas legadas [27].

Os operadores exigem cada vez mais das redes ópticas, obrigados a acompanhar o desenvolvimento de serviços de banda larga cada vez mais utilizados e que exigem:

- Aumento da largura de banda;
- Capacidade de suporte de serviço;
- Melhor desempenho nos nós de acesso;
- Capacidade de reutilização das redes legadas;

Do ponto de vista do FSAN e do ITU-T⁸ o desenvolvimento das redes de próxima geração foi dividido em duas fases distintas:

- NG-PON1 – Também designada por XG-PON, é considerada uma evolução de curto prazo, padronizada em 2010 (G.987). downstream de 10 Gbps e upstream de 2.5 Gbps;
No essencial o NG-PON 1 representa, no essencial uma melhoria do TDM PON utilizada pelo GPON no que concerne à (i) capacidade, (ii) alcance, (iii) largura de banda e (iv) número de utilizadores.
- NG-PON2 – Considerada uma tecnologia de médio prazo, tendo sido padronizada em 2015 pelo ITU-T (G.989). Capaz de suportar até 40Gbit/s de capacidade agregada para *downstream* para aplicações residenciais e comerciais, *backhaul* móveis e outras aplicações com capacidade até 40Gbps.

4.3.2.1 NG-PON1

A tecnologia NG-PON1 está ainda em evolução, apesar de padronizada em 2009 apresenta ainda escassos fornecedores tecnológicos e não tem despertado o interesse dados operadores desde o anúncio da tecnologia NG-PON2. [27]

Esta tecnologia permite mais graus de *splitagem* e disponibiliza débitos mais elevados:

- 2,5Gbps para Upstream;
- 10Gbps para Downstream;

As actuais ODN têm infraestruturas com split ratio de 1:32 e 1:64 de acordo com o link budget associado á tecnologia GPON, sendo este o requisito mínimo para a NG-PON1 que garante a coexistência entre as duas tecnologias.

De acordo com a Recomendação ITU-T G.987.1, a função de controlo NG-PON1 deve suportar 256, ou mais, utilizadores a nível da “*splitagem*” óptica. Aumenta assim a atractividade para os

⁸ Os FSAN em conjunto com ITU-T constituem o fórum de padronização e standardização principais no estudo deste tipo de redes.

operadores, servir mais utilizadores finais, permitir maior alcance e estender o ODN até ao *backhaul*.

A Figura 33 representa possíveis cenários de aplicação NG-PON1 e a respectiva arquitectura de rede.

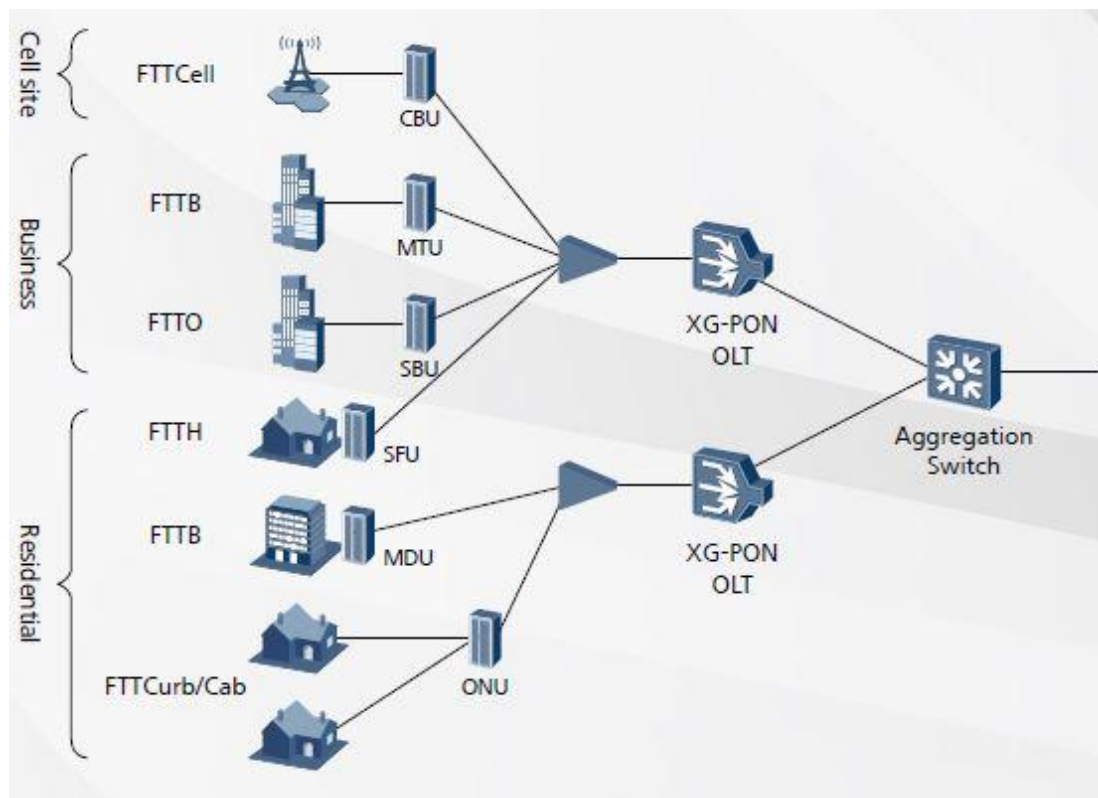


Figura 33- Cenários de aplicação e arquitecturas de rede NG-PON1 [28]

A Figura 34 mostra-nos o plano de alocação dos comprimentos de onda (ITU-T G.984.5) que assegura a compatibilidade da NG-PON1 com a GPON:

- 1260-1280nm para *Upstream*;
- 1575-1580 para *Downstream*;

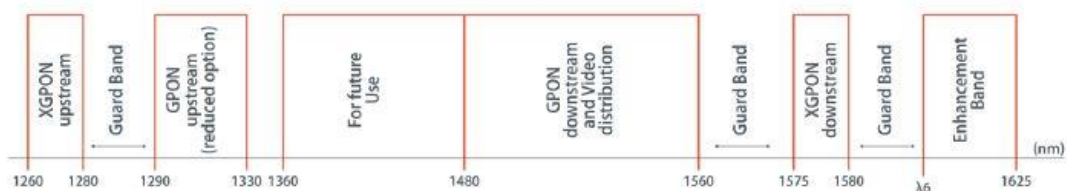


Figura 34 - Alocação de comprimentos de onda GPON e XG-PON [29] [30].

A recomendação G.984.5 redefine a gama de comprimentos de onda para permitir a coexistência com a GPON e serviços adicionais, incluído vídeo e serviços de próxima geração (NGA – *Next Generation Access*).

Para garantir a coexistência de NG-PON1 e GPON na mesma PON, no Central Office deverá existir um filtro WDM capaz de combinar o sinal de vídeo com o sinal para o utilizador conforme apresentado na Figura 35.



Figura 35 - Diagrama de coexistência GPON e NG-PON1 [27]

Um obstáculo à implementação de NG-PON1, na mesma infraestruturas óptica legada (GPON) é a eventual existência de ONUs sem filtros de bloqueio capazes de eliminar a interferência dos comprimentos de onda NG-PON1. Nestas situações, o operador terá que migrar o ONU do cliente ou instalar filtros externos junto do ONU para garantir a coexistência de tecnologias. Saliente-se contudo que esta operação não implica perda de serviço para os restantes utilizadores.

4.3.2.2 NG-PON2

Do ponto de vista dos operadores que constituem o FSAN, o NG-PON2 era visto como uma tecnologia disruptiva, explorada a partir de um novo ODN assente em divisores de comprimentos de onda em detrimento dos divisores ópticos de energia. Contudo, os avultados investimentos exigidos por uma opção desta natureza originou um recuo e clarificou-se como requisito fundamental a compatibilidade com a ODN instaladas. Tal, não significa que os divisores ópticos de comprimentos de onda não sejam o foco desta tecnologia, mas não são uma exigência ao seu funcionamento.

A tecnologia adoptada pelo FSAN para o NG-PON2 foi o TWDM-PON (*Time and Wavelength Division Multiplex*), pelo facto de ser menos disruptiva e conseqüente de implementação menos dispendiosa para os operadores.

O princípio de funcionamento do TWDM-PON assenta na existência de múltiplos comprimentos de onda, partilhados pelos diversos ONUs, através da multiplexagem no tempo (TDM) e de múltiplos mecanismos de acesso.

Os sistemas TWDM-PON fornecem quatro comprimentos de onda por fibra (podendo ir até oito comprimentos de onda), o que permite aumentar a capacidade das redes ópticas:

- 10Gbps para *Upstream*;
- 40Gbps para *Downstream*;

A Figura 36 representa um esquema de funcionamento TWDM-PON, constituída por um anel principal WDM com protecção e ramificações TDM, fazendo a fibra chegar aos pontos de consumo final.

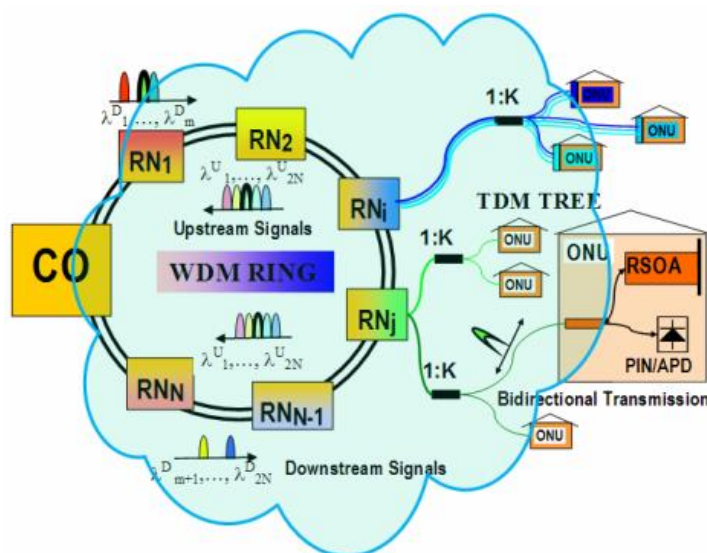


Figura 36 – Exemplo de uma rede TWDM-PON [31]

O aumento de capacidade e a flexibilidade da NG-PON2, constituem um novo impulso para o desenvolvimento e implantação das redes de fibra óptica [32]:

- Permite uma melhor gestão da largura de banda atendendo aos serviços providenciados - Por exemplo disponibilizar maior largura de banda simétrica para determinados serviços corporativos ou largura de banda assimétrica para as ligações *ao backhaul* das redes móveis.

- Permite a sobreposição de múltiplos serviços e grupos de utilizadores sobre a mesma fibra – Um operador poderá atribuir comprimentos de onda específicos para isolar serviços fornecidos.
- Permite que os utilizadores partilhem a capacidade remanescente de largura de banda não utilizada – Os operadores podem superar a oferta contratualizada com o utilizador para acelerar determinadas acções do utilizador (download de vídeos HD ou *backup* de dados na Cloud), quando que exista capacidade disponível.
- Permite que diferentes comprimentos de onda possam ser atribuídos a diferentes operadores - Facilitando a partilha de infraestruturas entre operadores.
- Permite que os comprimentos de onda sejam adicionados individualmente a cada PON de acordo com as necessidades, numa lógica pay-as-you-grown.

Uma vertente importante é a possibilidade de reutilização do trajecto óptico da ODN existente, permitindo a coexistência com os sistemas legados [33] e a convergência de serviços e utilizadores sobre a mesma infraestura (Figura 37).

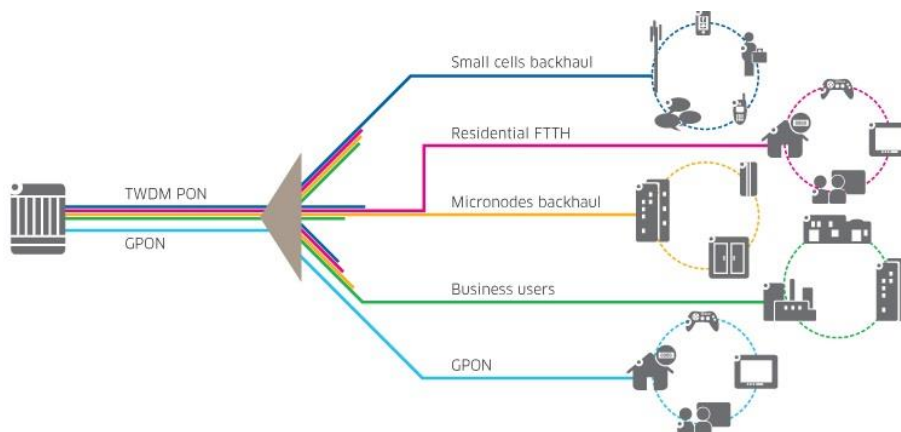


Figura 37 - Utilização de diferentes comprimentos de onda por serviço [32].

Para compreender a coexistência das tecnologias legadas com NG-PON2 a Figura 38 ilustra a alocação dos comprimentos de onda definida pela recomendação G.989.2.

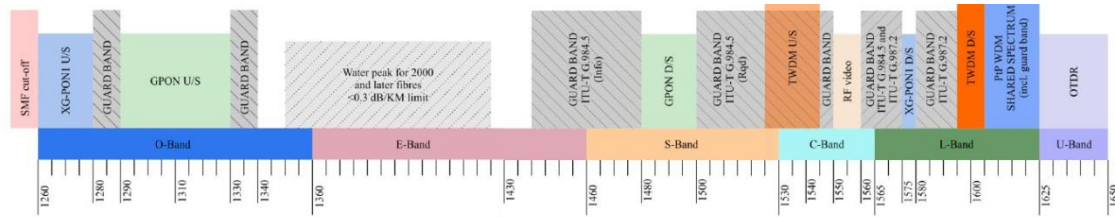


Figura 38 - Alocação de comprimentos de onda NG-PON2 e PON legadas [34]

A coexistência das redes PON legadas com o NG-PON2 implicará a existência de um novo filtro WDM, designado elemento de coexistência (CE – Co-existence Element), capaz de combinar/dividir os diferentes comprimentos de onda característicos de cada tecnologia (Figura 39).

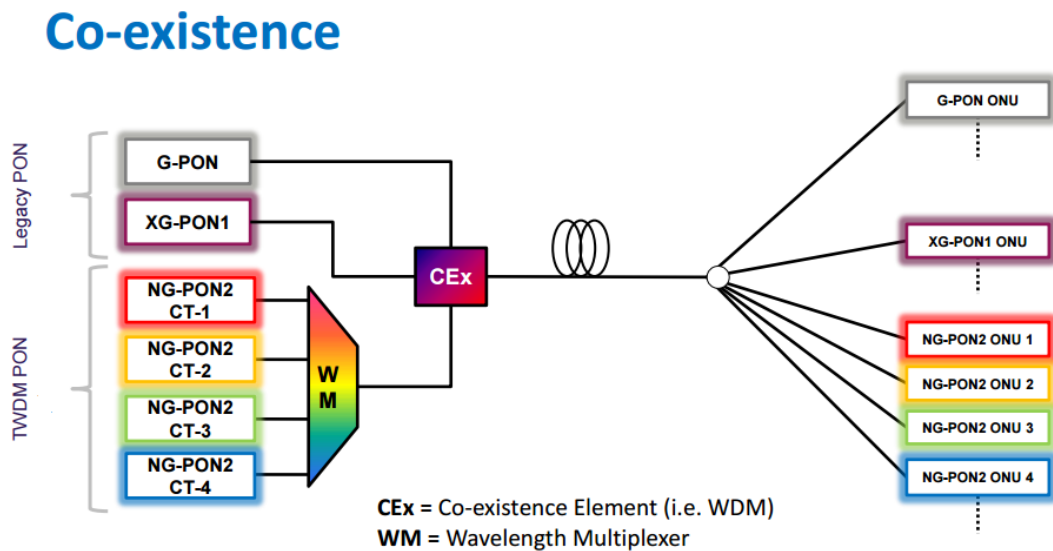


Figura 39 – Esquemático de coexistência TWDM PON com as PON legadas [33]

A tecnologia NG-PON2 pode suportar três topologias:

- *Basic* – 40Gbps para downstream e 10Gbps para upstream, utilizando 4 comprimentos de onda
- *Extended* – 80Gbps para downstream e 20Gbps para upstream, utilizando 8 comprimentos de onda
- *Business* – Serviços simétricos, de 40/40Gbps até 80/80Gbps

Opcionalmente, NG-PON2 também permite a topologia ponto-a-ponto WDM, com grande interesse para o *backhaul* das redes móveis, uma vez que é previsível as tecnologias de redes de banda larga sem fios poderem vir a suportar débitos até 10Gbps. Neste cenário, são atribuídos dois comprimentos de onda, disponíveis no espectro NG-PON2, a cada site da rede móvel.

5. Dimensionamento

Apesar do projecto de dimensionamento de uma rede PON ser uma problemática estudada há mais de duas décadas, subsistem ainda desafios não completamente ultrapassados, nomeadamente os que têm a ver com os seguintes aspectos [5]:

- Aleatoriedade temporal relativa aos momentos em que os utilizadores se tornam clientes da infraestrutura.
- Aleatoriedade espacial relativa aos locais em que os utilizadores se tornam clientes da infraestrutura.
- Aleatoriedade quanto aos perfis e intensidade de consumo de serviços dos utilizadores.

Daqui resultam desafios em termos de planeamento de cobertura, capacidade e respectivo faseamento temporal.

Nas secções seguintes aborda-se um subconjunto desta problemática:

- Dimensionamento de *Power Budget*
- Dimensionamento de Capacidade

O dimensionamento de *Power Budget* tem sido amplamente estudado e referenciado na literatura (p.ex.: [35]) pelo que a abordagem a seguir apresentada se limita a uma síntese. Contrariamente, o dimensionamento de capacidade constitui o enfoque principal de análise nas seguintes secções dado se tratar de um aspecto ainda insuficientemente estudado.

5.1 Power Budget

O cálculo de *power budget* numa PON consiste no dimensionamento dos níveis de potência óptica desde a OLT até à ONU de modo a garantir que o sinal no receptor excede ou iguala o mínimo permitido em função da sensibilidade do receptor aí instalado. Entre outros factores, depende do número de vezes que sinal é dividido, das distâncias percorridas para a ligação entre o equipamento de transmissão (OLT) do *central office* e o ponto de consumo final (ONT). O cálculo do *power budget* deve garantir que o sinal no receptor é suficiente para cobrir todas as perdas devidas à distribuição pela rede de fibra óptica (ODF).

De acordo com [22], o *power budget*, expresso em decibéis, é definido pela subtração da potência do sinal recebido pelo equipamento do utilizador e pela margem de segurança definida, à potência do sinal transmitido. Se durante o percurso forem introduzidos amplificadores de sinal, o seu ganho de potência é adicionado e as perdas derivadas da sua inserção são subtraídas.

As perdas de sinal provocadas pelos *splitters* são definidas por um factor de escala constante, C , multiplicada por um logaritmo de base dois do número de divisões definida pelo *splitter*, N :

$$L_{Splitter} = C \log_2 N$$

Donde:

$$T_x - SM + P_{Amp} - C - L_{Splitter} \geq R_x \quad (1)$$

Como consequência, o planeamento de uma rede deve considerar que a utilização de múltiplos estágios de *splitagem* pode reduzir o seu alcance.

Para definir o alcance de uma rede (R), em Kms, o *power budget* calculado é dividido pela perda de potência por quilómetro de fibra, (L_{fib} é uma propriedade da fibra):

$$R(Km) = \frac{T_x(dbm) - R_x(dbm) - SM(db) + P_{Amp}(db) - C(db) - L_{Splitter}(db)}{L_{fib}(\frac{db}{Km})} \quad (2)$$

R – Alcance da rede	P_{Amp} – Ganho de potência devido aos amplificadores de sinal
T_x – Potência do sinal transmitido	C – Perda de potência causada pela inserção de conectores ópticos
R_x – Potência do sinal recebido	$L_{Splitter}$ – Perda de potência devida aos splitters
SM – Margem de segurança	L_{fib} – Perda de potência por quilómetro de fibra

Os utilizadores servidos pela mesma PON partilham a potência do sinal transmitido.

A Figura 40 ilustra a perda de potência ao longo de um percurso óptico numa PON com N níveis de *splitagem* e onde não existem amplificadores de sinal.

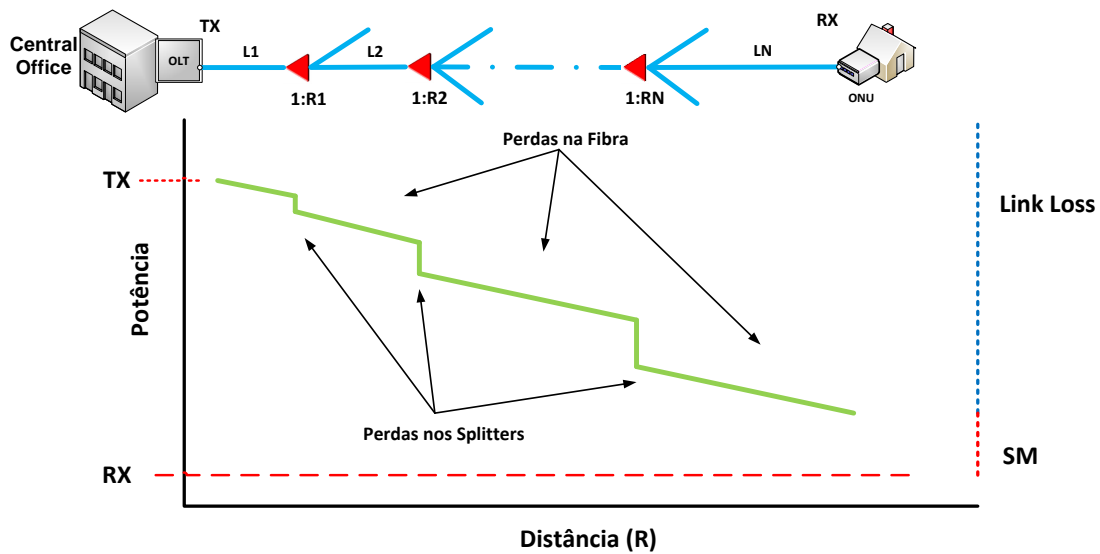


Figura 40 – Ilustração da perda de potência numa PON com 3 níveis de splitagem

Considerando um exemplo concreto considerando as perdas constantes na Tabela 3:

L_{fib} (db/Km)			$L_{splitter}$ (db)						
$\lambda=1550$	$\lambda=1490nm$	$\lambda=1310nm$	1:1	1:2	1:4	1:8	1:16	1:32	1:64
0,2	0,22	0,35	0,5	3	6	9	12	15	18

Tabela 3 – Atenuações por elemento de rede

Considerando 3 níveis de splitagem (com factores de splitting 1:2, 1:4 e 1:8). Assumindo que a potência transmitida pela OLT e a margem de segurança na ONU é 3db, determinou-se a distância possível entre a OLT e a ONU para que o decaimento fosse inferior a 28db, obedecendo à norma GPON.

Assim:

- $R = 20Km$
- $Link Loss = -25 db$

Note-se que para este cálculo se considera a maior das perdas de potência por quilómetro a que corresponde $\lambda = 1310nm$.

A Figura 41 apresenta um possível algoritmo de planeamento de uma rede óptica, determinada pelo cálculo do *power budget* e pela viabilidade económica da implantação.

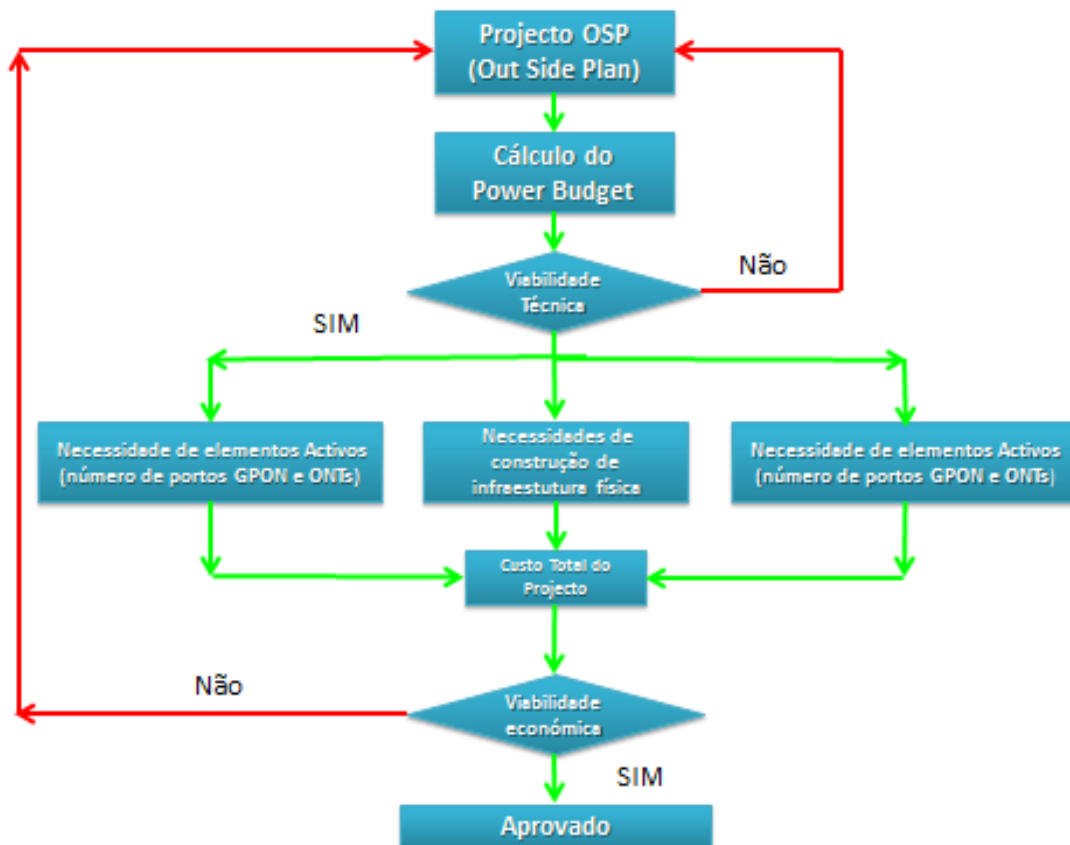


Figura 41 – Algoritmo de planeamento de uma rede óptica determinada pelo cálculo do *power budget*

A distribuição otimizada de splitters ao longo de um caminho óptico deve, em primeira instância, considerar a topologia de implementação mais adequada. Esta optimização permite estimar a distância necessária e só posteriormente definir o número de splitters a utilizar, atendendo às especificidades geográficas, tecnológicas e dos serviços a disponibilizar ao utilizador.

5.2 Dimensionamento de capacidade em Redes Ópticas Passivas

Considerando uma rede óptica passiva, com um *split ratio* de 1:N, capaz de servir os N utilizadores nas mesmas condições, pretende-se definir um modelo de dimensionamento de capacidade de uma rede óptica passiva que, rentabilizando os recursos dos operadores, garanta as necessidades dos utilizadores face à largura de banda disponível.

O número máximo de utilizadores que partilham a mesma infraestrutura física depende da tecnologia utilizada (GPON, NGPON1 e NGPON2).

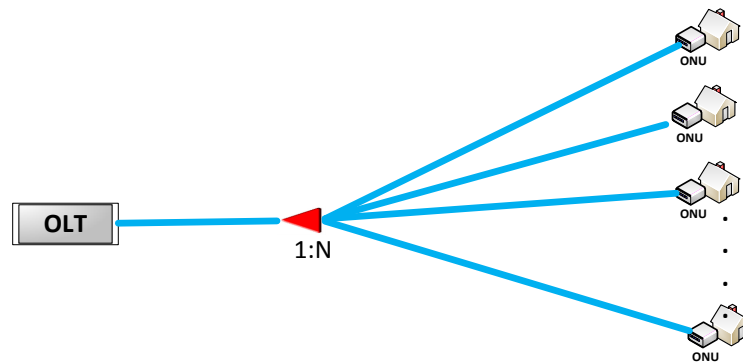


Figura 42 – Esquemático de uma PON com um factor de splitting 1: N

Para melhor compreender o método desenvolvido no presente capítulo, importa referenciar à *priori* alguns conceitos fundamentais:

b_{opt} – Largura de banda óptica;

b_{eff} – Largura de banda efectiva;

b_{av} – Largura de banda disponível por utilizador;

b_{min} – Largura de banda mínima garantida;

η – Eficiência do protocolo;

p – Probabilidade de um utilizador estar activo;

Para o caso ilustrado na Figura 42, é possível observar empiricamente que num dado instante t apenas um subconjunto de N utilizadores acede simultaneamente à rede. Ou seja, apesar de fisicamente ligados, os utilizadores não acedem constantemente aos recursos que lhe são disponibilizados.

Cada utilizador tem uma probabilidade p de estar activo a que corresponde uma probabilidade $1 - p$ de estar inactivo. O comportamento que define o estado de um utilizador (activo ou inactivo) não está correlacionado com o comportamento dos restantes utilizadores.

Definindo:

- N – Número total de utilizadores que partilham a mesma PON;
- N_{act} – Número total de utilizadores activos num dado instante;

Em que: $0 \leq N_{act} \leq N$.

A probabilidade de ter um determinado número de utilizadores simultaneamente activos, N_{act} , de um total de N utilizadores é dada pela função densidade de probabilidade (distribuição binomial):

$$a[N_{act}] = \frac{N!}{(N - N_{act})!N_{act}!} (1 - p)^{N - N_{act}} p^{N_{act}} \quad (3)$$

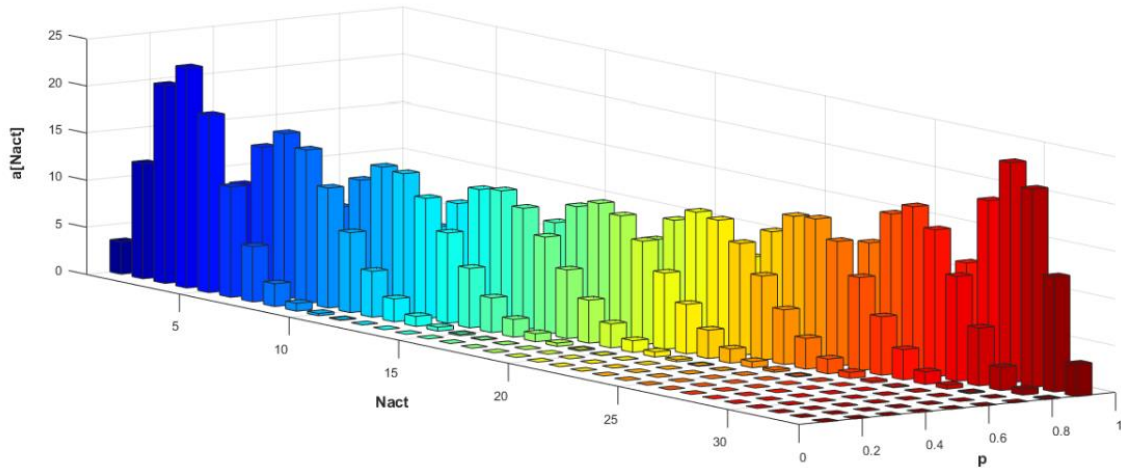


Figura 43 – Função densidade de probabilidade do número de utilizadores simultaneamente activos para diferentes valores de p (assumindo $N=32$)

O gráfico apresentado na Figura 43 permite visualizar a função densidade de probabilidade para diferentes valores de p , para um exemplo de 32 utilizadores. Aumentando o valor de p verifica-se o crescimento do número médio de utilizadores activos.

O número médio de utilizadores activos corresponde ao valor da esperança matemática de N_{act} e pode ser determinado pela expressão: $E(N_{act}) = N \cdot p$.

Note-se que para um valor de $p = 0,5$ o número médio de utilizadores activos corresponde a $N / 2$.

A largura de banda efectiva, b_{eff} , a partilhar por todos os utilizadores depende da eficiência do protocolo da PON (η) e da largura de banda óptica fornecida pelo OLT:

$$b_{eff} = \eta \cdot b_{opt} \quad (4)$$

A largura de banda disponível por utilizador, b_{av} , num determinado instante é uma variável que depende do número máximo de utilizadores activos nesse instante:

$$b_{av} = \frac{b_{eff}}{N_{act}} \quad (5)$$

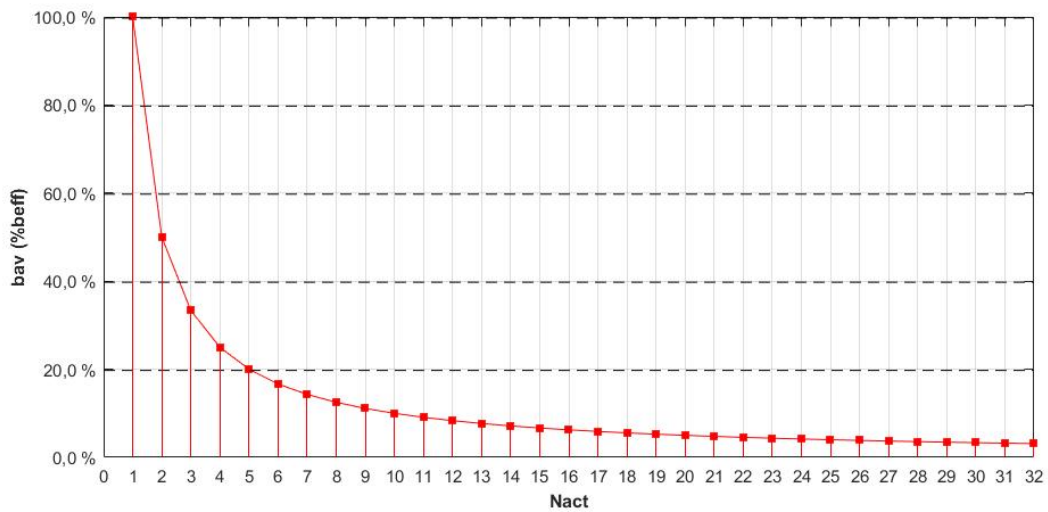


Figura 44 – Variação da largura de banda disponível em função do número de utilizadores activos (para N=32)

Note-se que, aumentando N_{act} reduz-se a largura de banda a disponibilizar a cada utilizador. Quando $N_{act} = N$ e assumindo que a política de distribuição de largura de banda pelos utilizadores é equitativa, a largura de banda disponível que se pode garantir a cada utilizador terá o seu valor mínimo e será dada por:

$$b_{min} = \frac{b_{eff}}{N} \tag{6}$$

Por razões comerciais um operador poderá decidir que a largura de banda a disponibilizar a um cliente seja menor que a divisão equitativa da largura de banda disponível. Nestas condições:

$$b_{av}(N_{act}) = \min \left\{ \frac{b_{eff}}{N_{act}}, b_{prometida} \right\} \tag{7}$$

Se o operador quiser prometer uma largura de banda maior que $\frac{b_{eff}}{N}$, será obrigado a limitar o número máximo de utilizadores servidos pela PON, (N). O número máximo de utilizadores servidos pela PON é limitado pela largura de banda prometida de acordo com a expressão seguinte⁹:

⁹ A limitação do número máximo de utilizadores servidos pela PON que define o novo split ratio $1:N_{max}$ pode ser efectuada através dos splitters ópticos instalados na PON ou através de mecanismos de gestão da OLT.

$$N_{max} = \left\lfloor \frac{b_{eff}}{b_{prometida}} \right\rfloor \quad (8)$$

De facto, os utilizadores apenas recebem mais largura de banda do que aquela que lhes é prometida ($b_{prometida}$) pelos operadores quando o número de utilizadores activos é inferior a $\frac{b_{eff}}{b_{prometida}}$. Ou seja, quando $N_{act} < N_{max}$.

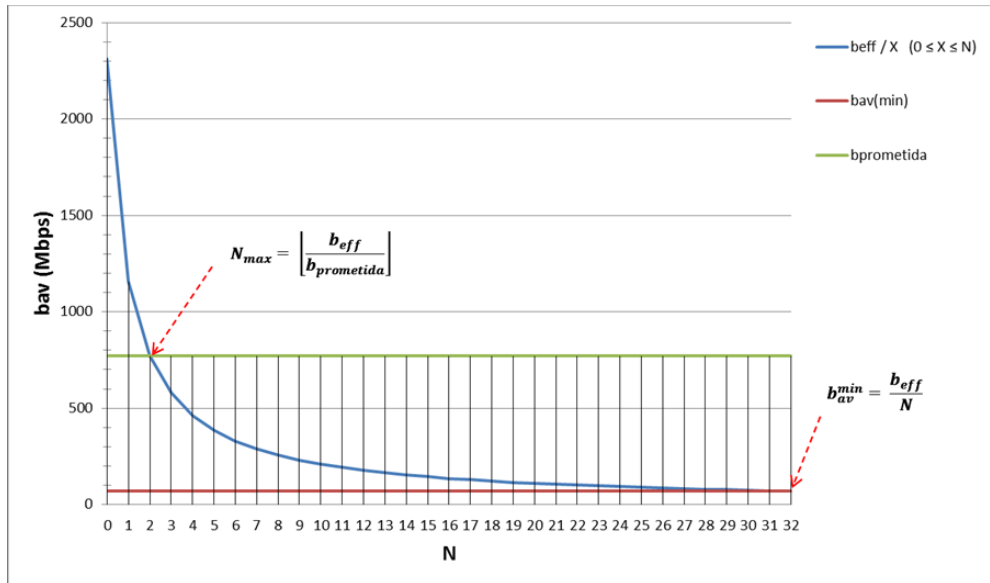


Figura 45 – Número máximo de utilizadores em função da largura de banda prometida (assumindo N=32)

A expressão seguinte relaciona as probabilidades das variáveis b_{av} e N_{act} em função da largura de banda prometida pelo operador:

$$P(b_{av} \geq b_{prometida}) = P\left(N_{act} \leq \frac{b_{eff}}{b_{prometida}}\right) \quad (9)$$

Como estamos na presença de um processo aleatório ergódico, em que as médias de conjunto são iguais às médias temporais, podemos definir a percentagem de tempo durante a qual se garante que b_{av} é disponibilizada a N_{act} da seguinte forma:

$$P_{av} = P(N_{act} \leq N_{max}) = \sum_{N_{act}=0}^{N_{act}=N_{max}} \frac{N!}{(N - N_{act})! N_{act}!} (1 - p)^{N - N_{act}} \cdot p^{N_{act}} \quad (10)$$

A percentagem de tempo durante a qual se garante que b_{av} é disponibilizada a N_{act} depende de p , de N_{max} e do próprio valor de N_{act} de acordo com a seguinte expressão:

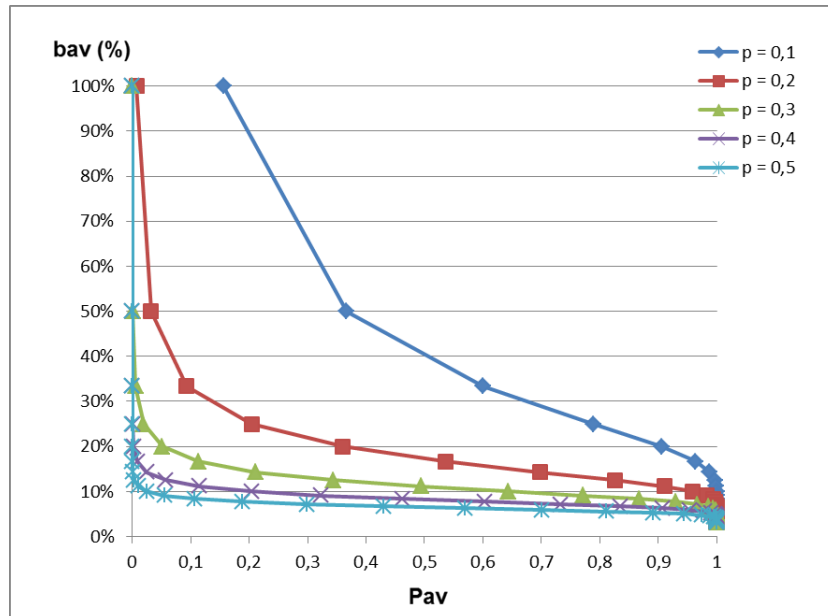


Figura 46 – Largura de banda disponibilizada (b_{av}) em função da probabilidade de tempo em que $b_{av} \geq b_{prometida}$.

A largura de banda média percebida pelo conjunto dos utilizadores servidos é dada pela esperança matemática, $E(b_{av})$, em função do número de utilizadores activos e da sua probabilidade, de acordo com a seguinte expressão:

$$E(b_{av}) = \sum_{N_{act}=0}^{N_{act}=N_{max}} b_{av}(N_{act}) \cdot a[N_{act}] \quad (11)$$

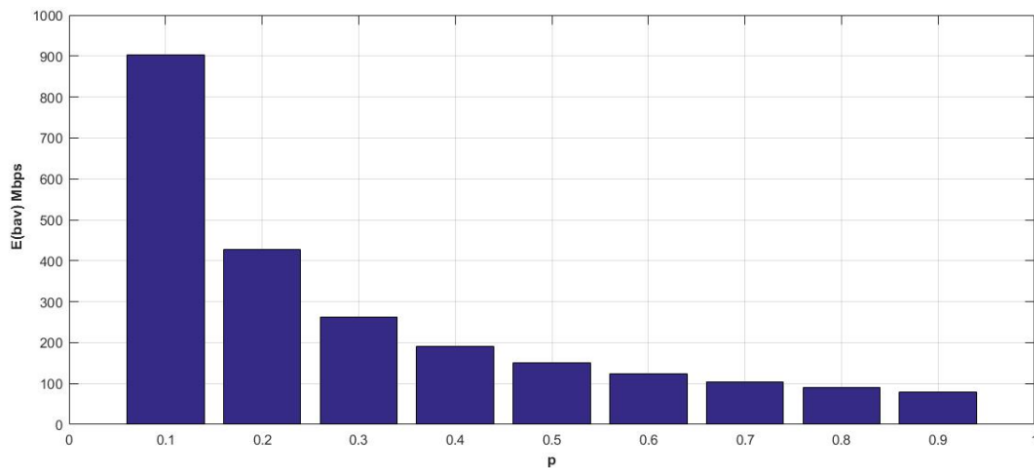


Figura 47 – Largura de banda percebida pelos utilizadores em função da probabilidade de actividade

As equações (10) e (11) permitem-nos determinar duas métricas importantes para o planeamento de redes PON:

- P_{av} – A percentagem de tempo em que se garante uma determinada largura de banda a um certo número de utilizadores activo. N_{act}
- $E(b_{av})$ – Largura de banda média percebida pelo conjunto de utilizadores activos.

Contudo, na perspectiva do planeamento de redes, deve-se partir de uma certa exigência de P_{av} para determinar o número de utilizadores activos, de um total de N_{max} utilizadores, aos quais se garante a largura de banda prometida, $b_{prometida}$, com uma certa probabilidade. Por outras palavras, pretende-se determinar o valor de N_{max} que satisfaça a seguinte expressão:

$$P(N_{act} \leq N_{max}) \geq P_{av} \quad (12)$$

Numa primeira abordagem considerou-se que todos os utilizadores tinham as mesmas características e apresentavam a mesma probabilidade de actividade p . Nestas circunstâncias o operador distribui a largura de banda disponível de forma equitativa entre todos os utilizadores definindo uma certa exigência P_{av} .

No entanto, a mesma PON pode servir diferentes tipos de utilizadores que pelas suas características apresentam diferentes probabilidades de actividade p e necessitam de mais largura de banda disponível com maior grau de exigência (ou seja, maior P_{av}).

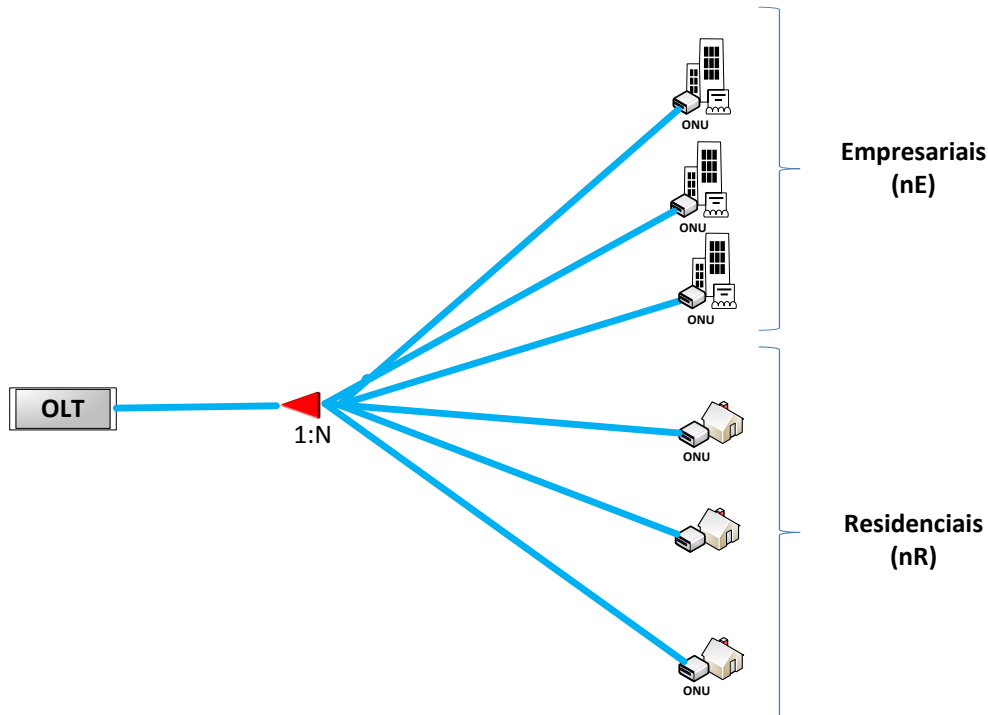


Figura 48 – Esquemático de uma PON partilhada por dois tipos de utilizadores

Assumindo que a mesma PON é partilhada por dois tipos de utilizadores (Figura 48) com diferentes prioridades de acesso ao serviço:

- Empresariais (p_E)
- Residenciais (p_R)

E o grau de exigência destes dois de utilizadores é tal que:

$$P_{av_R} < P_{av_E} \quad (13)$$

Esta diferenciação em termos de probabilidade de actividade e da percentagem de tempo em que o serviço é disponibilizado requer uma configuração específica do algoritmo de alocação de largura de banda (DBA) na OLT.

Atribuindo aos utilizadores empresariais maior prioridade, poderemos garantir uma largura de banda definida ($b_{prometida_E}$) sempre que necessário. Assim, aos utilizadores residenciais será disponibilizada uma largura de banda, b_{min_R} , tal que:

$$b_{min_R} = \frac{b_{eff} - b_{prometida_E}}{N - n_{max_E}} \quad (14)$$

Em termos de largura de banda média percebida pelos utilizadores, poderemos assim reescrever a equação (11):

$$\begin{aligned}
 E(b_{av}) = & \sum_{N_{act}=0}^{N_{act}=n_E^{max}} b_{prometida_E}(N_{act}) \cdot a[N_{act}] \\
 & + \sum_{N_{act}=n_E^{max}+1}^{N_{act}=N} b_{av_R}(N_{act}) \cdot a[N_{act}] +
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

De acordo com a equação (8) é possível determinar n_E^{max} (a partir de $b_{prometida_E}$) e a partir desse valor determinar o número de utilizadores residenciais, n_R^{max} , capaz de partilhar a largura de banda não utilizada pelos utilizadores empresariais e simultaneamente garantir um certo valor de P_{av_R} definido.

Resumidamente, para garantir que na mesma PON coexistam dois tipos de utilizadores com diferentes características de actividade e prioridades de acesso também diferentes, é necessário determinar cada uma das combinações empresariais n_E ($0 \leq n_{act_E} \leq n_E$) e residenciais n_R ($0 \leq n_{act_R} \leq N - n_R$) que garantam as percentagens de tempo (P_{av_E} e P_{av_R}) exigidas para cada tipo de utilizador.

Neste modelo, a largura de banda efectiva ($b_{eff} = \eta \cdot b_{opt}$), disponibilizada pelo porto da OLT, é dividida pelos dois grupos de utilizadores em função das características de consumo e do número total de utilizadores de cada grupo.

$$b_{eff} = b_{eff_Emp} + b_{eff_Res}
 \tag{16}$$

Assumindo que a política de distribuição de largura de banda pelos pontos de consumo final é equitativa, poderemos reescrever a equação (16):

$$b_{eff} = n_E \cdot b_{min_E} + n_R \cdot b_{min_R}
 \tag{17}$$

Em que b_{min_E} e b_{min_R} , representam a largura de banda mínima garantida pelo operador aos utilizadores empresariais e residenciais.

Definindo a largura de banda mínima garantida para os utilizadores empresariais, b_{min_E} , é possível determinar a largura de banda efectiva a alocar ao grupo de utilizadores empresariais:

$$b_{eff_E} = n_E \cdot b_{min_E}
 \tag{18}$$

Sendo a largura de banda efectiva alocada aos utilizadores residenciais expressa em função de b_{eff_E} :

$$b_{eff_R} = b_{eff} - (n_E \cdot b_{min_E}) \quad (19)$$

E a largura de banda mínima garantida aos utilizadores residenciais:

$$b_{min_R} = \frac{b_{eff_R}}{n_R} \quad (20)$$

Em função de b_{eff_E} e b_{eff_R} , é assim possível tratar cada grupo de utilizadores como uma sub-PON.

Assumindo que a largura de banda efectiva alocada a cada grupo de utilizadores é sempre distribuída equitativamente por todos os utilizadores activos:

$$b_{av_E}(n_{act_E}) \geq b_{min_E} \quad (21)$$

$$b_{av_R}(n_{act_R}) \geq b_{min_R} \quad (22)$$

Ou seja, quando $N_{act} < N$, a parte da largura de banda efectiva não utilizada, b_{extra} , pode ser determinada:

$$b_{extra_E} = b_{eff_E} - n_{act_E} \cdot b_{min_E} \quad (23)$$

$$b_{extra_R} = b_{eff_R} - n_{act_R} \cdot b_{min_R} \quad (24)$$

e distribuída equitativamente pelos utilizadores activos. Assim, a largura de banda disponível por utilizador num determinado instante será:

$$b_{av_E}(n_{act_E}) = b_{min_E} + \frac{b_{extra_E}}{n_{act_E}} \quad (25)$$

$$b_{av_R}(n_{act_R}) = b_{min_R} + \frac{b_{extra_R}}{n_{act_R}} \quad (26)$$

Sabendo que o número médio de utilizadores activos é dado pelas expressões:

$$E\{n_{act_E}\} = n_E \cdot p_E \quad (27)$$

$$E\{n_{act_R}\} = n_R \cdot p_R \quad (28)$$

pode-se determinar a largura de banda média não utilizada por cada grupo de utilizadores:

$$\overline{b_{extra_E}} = b_{eff_E} - (n_E * p_E) * b_{min_E} \quad (29)$$

$$\overline{b_{extra_R}} = b_{eff_R} - (n_R * p_R) * b_{min_R} \quad (30)$$

A estimativa da largura de banda não utilizada revela-se um parâmetro importante na gestão da largura de banda a disponibilizar a cada utilizador, permitindo ao operador estimar a largura de banda média disponível para cada utilizador:

$$\overline{b_{av_E}} = b_{min_E} + \frac{\overline{b_{extra_E}}}{n_E * p_E} \quad (31)$$

$$\overline{b_{av_R}} = b_{min_R} + \frac{\overline{b_{extra_R}}}{n_R * p_R} \quad (32)$$

Desenvolvendo as equações (31) e (32) obtêm-se as seguintes relações:

$$\overline{b_{av_E}} = \frac{b_{min_E}}{p_E} \quad (33)$$

$$\overline{b_{av_R}} = \frac{b_{min_R}}{p_R} \quad (34)$$

5.2.1 Cenário de estudo

O cenário proposto é definido por uma topologia FTTH, instalando fibra óptica desde o central office até aos diferentes pontos de consumo final. O número de pontos de consumo final é definido pelo split-ratio (considerando um split-ratio 1:64) do único splitter utilizado nesta configuração conforme ilustra a Figura 49.

Note-se que a repartição óptima do tipo de utilizadores é um problema de programação linear, dependente dos tarifários, dos padrões de utilização e da incerteza geográfica, encontrando-se fora do âmbito desta dissertação.

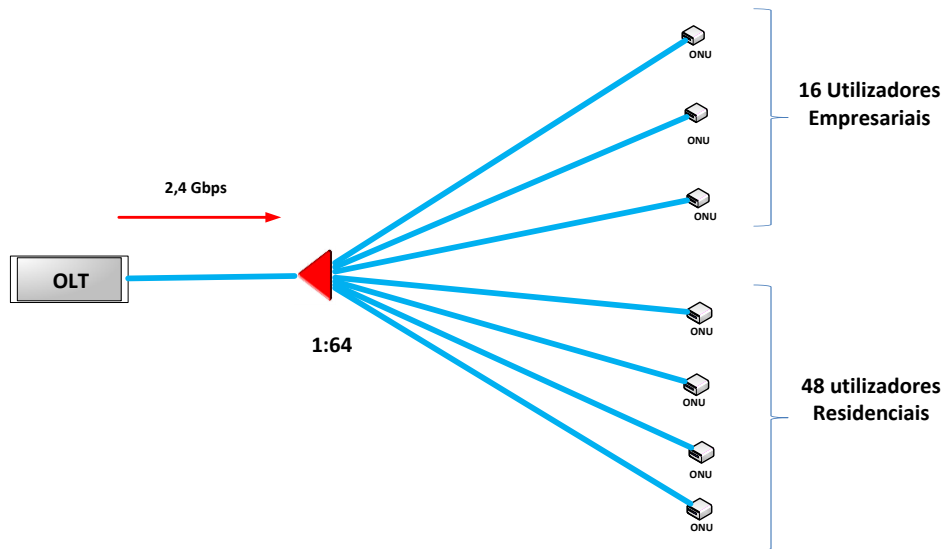


Figura 49 – Configuração FTTH, com um único estágio de splitagem que serve dois grupos de utilizadores

Considerando, um cenário típico de uma única PON que serve dois grupos de utilizadores distribuídos da seguinte forma:

- 16 Utilizadores Empresariais (n_E)
- 48 Utilizadores Residenciais (n_R)

Assumindo a largura de banda mínima garantida para os utilizadores empresariais,

- $b_{\min_E} = 65 \text{ Mbps}$

Determina-se a largura de banda efectiva alocada aos utilizadores empresariais, a partir da equação (18):

- $b_{\text{eff}_E} = 1040 \text{ Mbps}$

A largura de banda efectiva alocada aos utilizadores residenciais, expressa em função de b_{eff_E} (19) é

- $b_{\text{eff}_R} = 1448 \text{ Mbps}$

Permitindo ao operador garantir aos utilizadores uma largura de banda mínima de:

- $b_{\min_E} = 30,17 \text{ Mbps}$

A Figura 50 mostra-nos a distribuição da largura de banda disponível em função do número de utilizadores activos em cada grupo de uma forma determinística

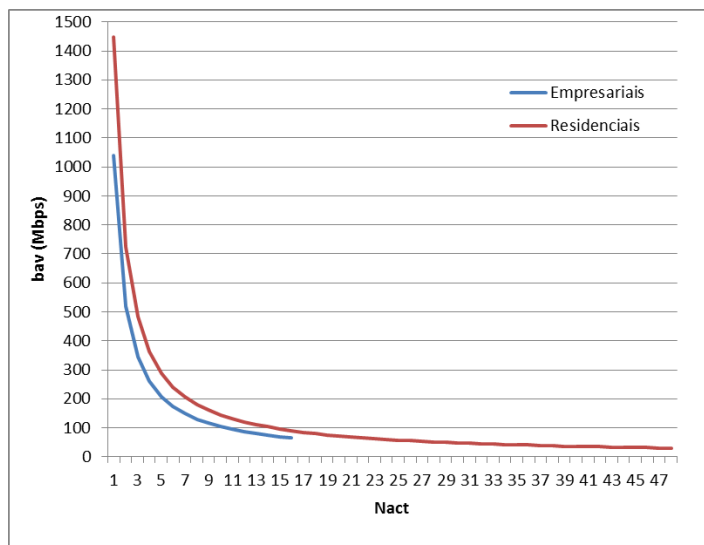


Figura 50 – Variação da largura de banda disponível em função do número de utilizadores activos

Como se assume que a largura de banda é equitativamente distribuída por todos os utilizadores activos de cada grupo, nesta configuração, constata-se que quando $n_{act_R} \leq 22$, a largura de banda dedicada a cada utilizador residencial supera a largura de banda dedicada a cada cliente empresarial.

Saliente-se que o operador, por razões comerciais, poderá limitar a largura de banda, $b_{prometida}$, a disponibilizar a cada utilizador. Assim:

$$b_{av}(N_{act}) = \min \left\{ \frac{b_{eff}}{N_{act}}, b_{prometida} \right\} \quad (35)$$

Na realidade, a probabilidade de ter todos os utilizadores simultaneamente activos é muito baixa. A probabilidade de ter um determinado número de utilizadores simultaneamente activos, N_{act} , de um total de N utilizadores é dada pela função densidade de probabilidade e determinada para cada grupo de utilizadores:

$$a[n_{act_E}] = \frac{n_E!}{(n_E - n_{act_E})! n_{act_E}!} (1 - p)^{n_E - n_{act_E}} \cdot p^{n_{act_E}} \quad (36)$$

$$a[n_{act_R}] = \frac{n_R!}{(n_R - n_{act_R})! n_{act_R}!} (1 - p)^{n_R - n_{act_R}} \cdot p^{n_{act_R}} \quad (37)$$

A Figura 51 ilustra a função densidade de probabilidade do número de utilizadores simultaneamente activos em cada grupo.

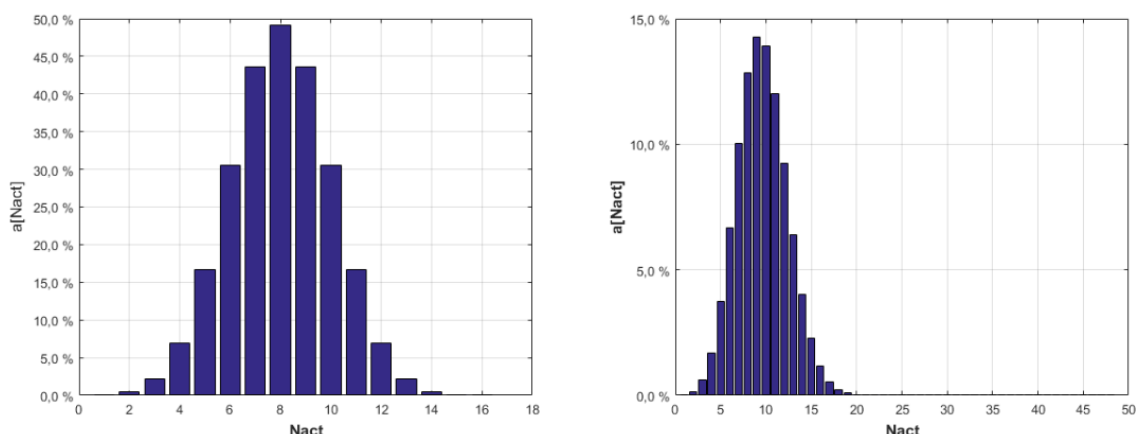


Figura 51 – Função densidade de probabilidade do número de utilizadores simultaneamente activos em cada grupo

O gráfico da esquerda representa os utilizadores empresariais com uma probabilidade de actividade, $p_E = 0,5$ e o gráfico da direita as utilizadores residenciais com uma probabilidade de actividade $p_R = 0,2$.

Assumindo a distribuição binomial representada na Figura 51 e os respectivos valores de p_E e p_R , é possível determinar a percentagem de tempo, P_{av} , durante a qual se garante uma determinada b_{av_E} e b_{av_R} disponibilizada a n_{act_E} e n_{act_R} :

$$P_{av_E}(n_{act_E} \leq n_E) = \sum_{n_{act_E}=0}^{n_E} \frac{n_E!}{(n_E - n_{act_E})! n_{act_E}!} (1 - p)^{n_E - n_{act_E}} \cdot p^{n_{act_E}} \quad (38)$$

$$P_{av_R}(n_{act_R} \leq n_R) = \sum_{n_{act_R}=0}^{n_R} \frac{n_R!}{(n_R - n_{act_R})! n_{act_R}!} (1 - p)^{n_R - n_{act_R}} \cdot p^{n_{act_R}} \quad (39)$$

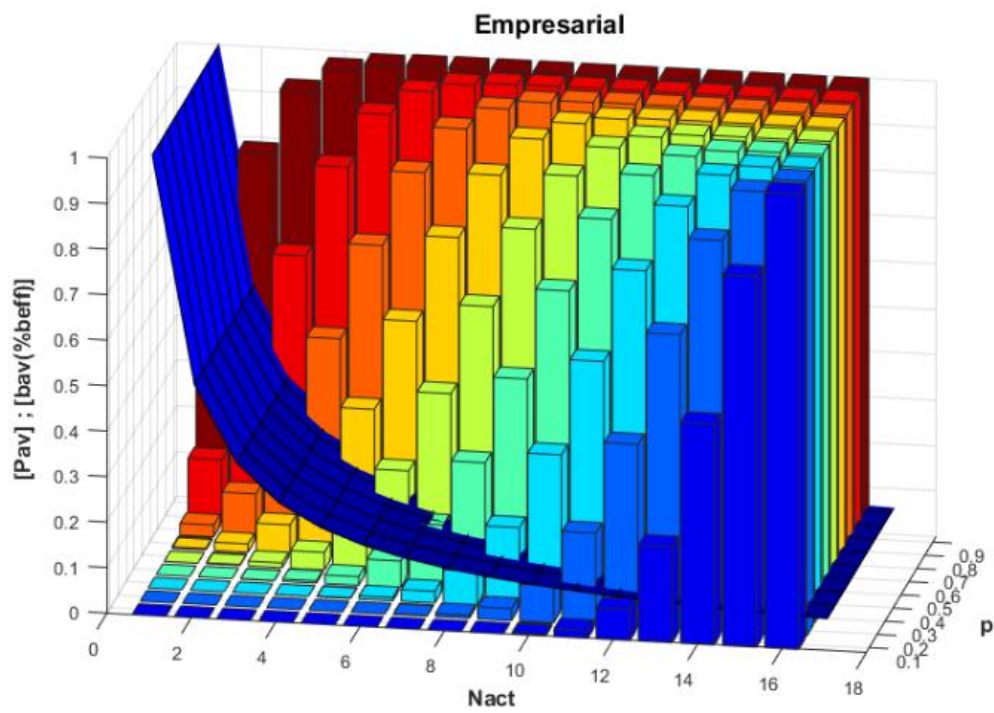


Figura 52 – Percentagem de tempo durante o qual é possível garantir uma determinada largura de banda a um conjunto de utilizadores empresariais activos

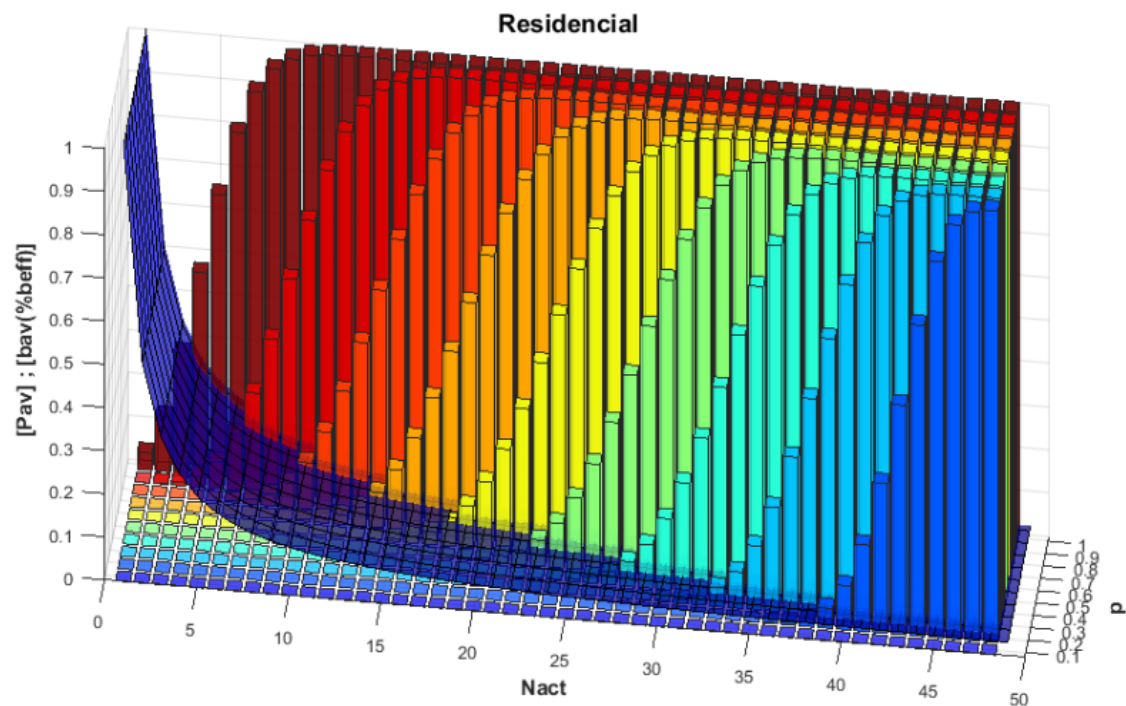


Figura 53 - Percentagem de tempo durante a qual é possível garantir uma determinada largura de banda a um conjunto de utilizadores residenciais activos

A Figura 52 e a Figura 53 evidenciam a percentagem de tempo durante a qual é possível disponibilizar b_{av} a um determinado número de utilizadores activos. Devendo o gráfico ser lido da seguinte forma:

- A uma determinada percentagem de tempo, descrita pelas barras P_{av_E} e P_{av_R} lida no eixo vertical, corresponde um número máximo de utilizadores activos (eixo horizontal) aos quais é possível disponibilizar uma determinada percentagem de largura de banda, b_{eff} , descrita pela intercepção da superfície curva com cada barra a considerar (o de valor de b_{eff} é dado pelo valor da superfície curva e lido no eixo vertical do gráfico).

Para o caso considerado ($p_E = 0,5$ e $p_R = 0,2$), obtêm-se os seguintes valores:

- $b_{extra_E} = 520 \text{ Mbps}$
- $b_{extra_R} = 1158,4 \text{ Mbps}$

No presente cenário (utilizadores empresariais com uma probabilidade de actividade, $p_E = 0,5$ e utilizadores residenciais com uma probabilidade de actividade $p_R = 0,2$.) a largura de banda

média disponível por cada tipo de utilizador (Empresarial e Residencial) dada pelas expressões (33) e (34) terá os seguintes valores:

- $\overline{b_{av,E}} = 130 \text{ Mbps}$
- $\overline{b_{av,R}} = 150,85 \text{ Mbps}$

A Figura 54 mostra a largura de banda média disponível por utilizador em função do factor de actividade.

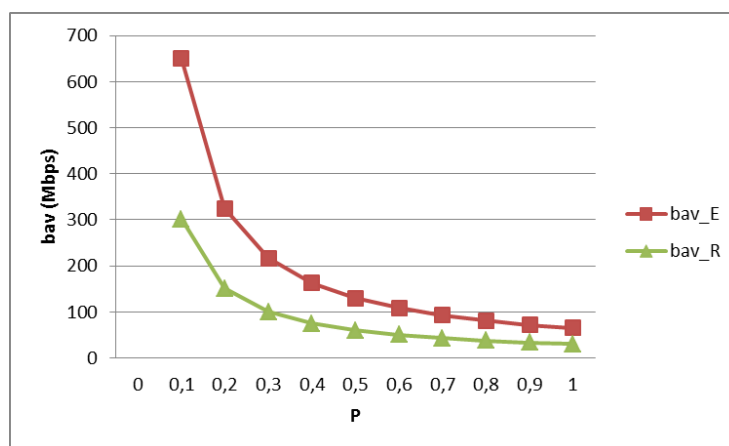


Figura 54 – Largura de banda média disponível por utilizador em função do factor de actividade

Definindo uma evolução temporal ao longo do dia, com base na variação da probabilidade de actividade, p , obtém-se o gráfico representado na Figura 55.

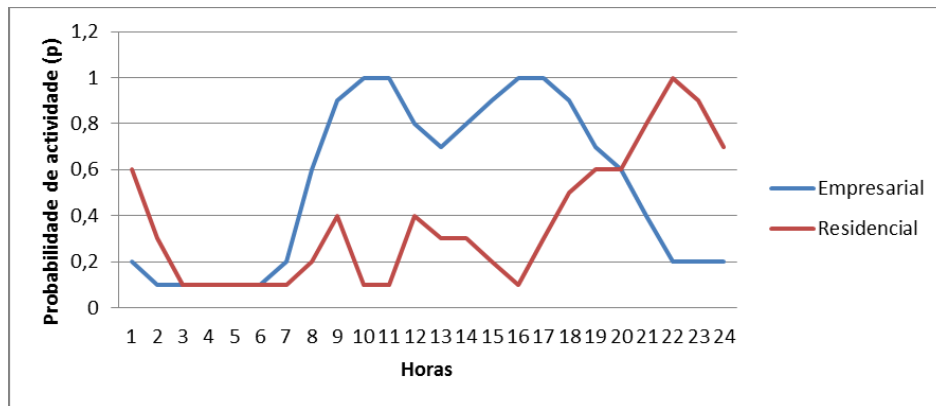


Figura 55 – Evolução da probabilidade de actividade, p , ao longo do dia

Recorrendo às equações (33) e (34) é possível determinar a largura de banda média não utilizada por grupo de utilizadores (b_{extra_E} e b_{extra_R}) em cada período temporal e representar graficamente a sua variação ao longo do dia (Figura 56).

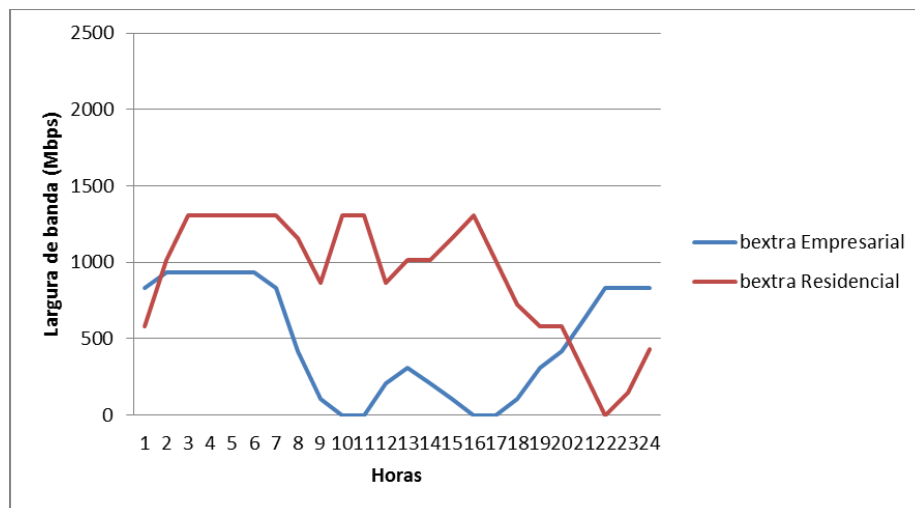


Figura 56 – Variação da largura de banda média não utilizada por grupo de utilizadores ao longo do dia

O gráfico da Figura 57 permite visualizar a largura de banda média disponível por utilizador (de acordo com as equações (33) e (34)), assumindo a distribuição equitativa da largura de banda extra de cada grupo, pelos elementos activos do próprio grupo.

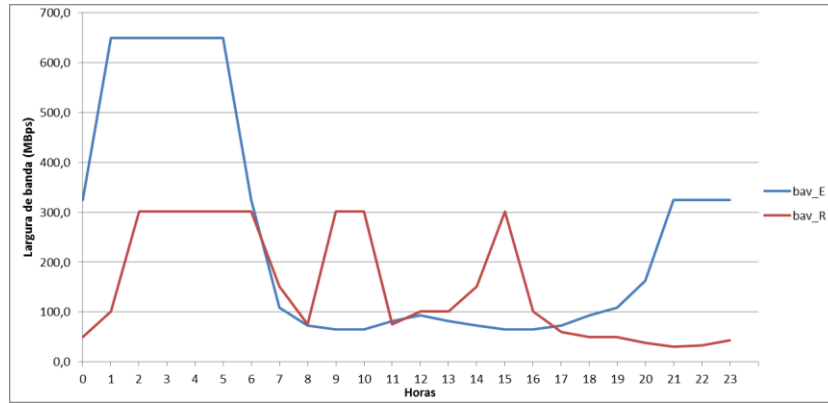


Figura 57 – Variação da largura de banda média disponível por utilizador em função da probabilidade de utilização

Em cada período temporal é possível determinar a largura de banda extra total, b_{extra} :

$$b_{extra} = b_{extra_E} + b_{extra_R} \quad (40)$$

A partir das equações (23) e (24), em que $b_{min_E} = \frac{b_{eff_E}}{n_E}$ e $b_{min_R} = \frac{b_{eff_R}}{n_R}$, podemos reescrever a equação (40):

$$b_{extra} = b_{eff_E} \cdot \left(1 - \frac{n_{act_E}}{n_E}\right) + b_{eff_R} \cdot \left(1 - \frac{n_{act_R}}{n_R}\right) \quad (41)$$

Sabendo ainda que $b_{eff_R} = b_{eff} - b_{eff_E}$, obtém-se:

$$b_{extra} = b_{eff_E} \cdot \left(\frac{n_{act_R}}{n_R} - \frac{n_{act_E}}{n_E}\right) + b_{eff} \cdot \left(1 - \frac{n_{act_R}}{n_R}\right) \quad (42)$$

A média da largura de banda extra total, $\overline{b_{extra}}$, é calculada a partir da equação (42) para um determinado número médio de utilizadores activos ($E(N_{act}) = N * p$), assumindo uma largura de banda mínima garantida (b_{min_E} e b_{min_R}):

$$\overline{b_{extra}} = b_{eff_E} \cdot (p_R - p_E) + b_{eff} \cdot (1 - p_R) \quad (43)$$

A Figura 58 permite-nos visualizar a média da largura de banda extra total ao longo do dia.

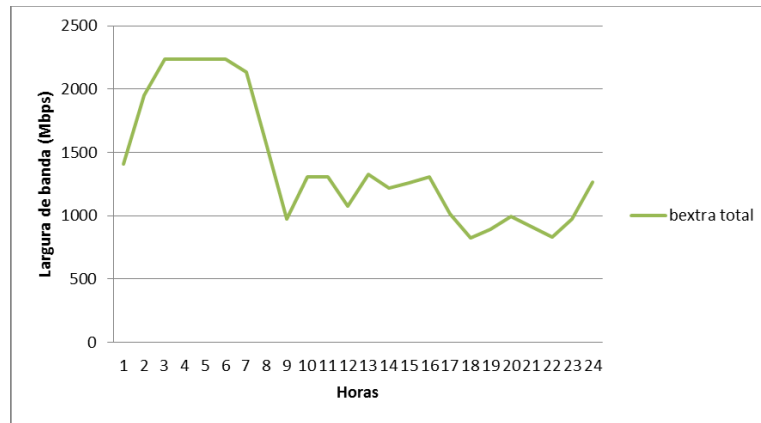


Figura 58 – Variação da largura de banda média não utilizada na PON ao longo do dia

Uma outra abordagem permite distribuir a largura de banda extra total, b_{extra} , em função da esperança média de utilizadores por grupo em cada período de tempo considerado. Desta forma podemos definir a largura de banda disponível por utilizador da seguinte forma:

$$b_{av_E} = b_{min_E} + \frac{b_{extra}}{n_E p_E + n_R p_R} \quad (44)$$

$$b_{av_R} = b_{min_R} + \frac{b_{extra}}{n_E p_E + n_R p_R} \quad (45)$$

Considerando a evolução das probabilidades de actividade, p , de acordo com o gráfico da Figura 55, pode-se representar a largura de banda disponível por tipo de utilizador (Figura 59):

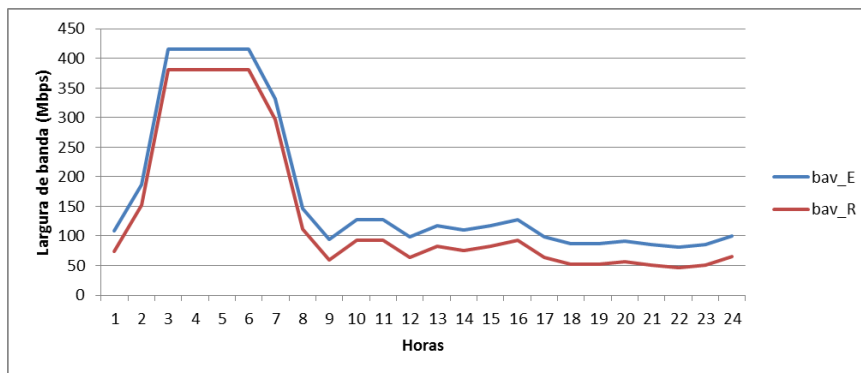


Figura 59 – Variação da largura de banda disponível em função da probabilidade de utilização

A Figura 59 permite-nos visualizar a largura de banda disponível por utilizador (de acordo com as equações (44) e (45)), assumindo a distribuição equitativa da largura de banda extra total em função da probabilidade de actividade de cada grupo de utilizadores ao longo dos diferentes períodos temporais.

Nos exemplos anteriores foi estudada a distribuição da largura de banda efectiva, b_{eff} , pelos utilizadores em função da sua probabilidade de actividade. Pretende-se agora definir a largura de banda disponível em função da probabilidade de actividade de cada utilizador e do seu perfil de consumo. Ou seja, a rede deve ser dimensionada para responder aos picos de consumo dos utilizadores.

Considere-se o exemplo conforme o listado na Tabela 4 com os requisitos indicados¹⁰:

¹⁰ Os valores indicados foram estimados com base em informação (não pública) proveniente de diferentes operadores.

Serviços	Débito (Mbps)
Voz	0,064
SDTV	2,5
HDTV	15
Partilha de arquivos e vídeo	5
Sistemas de segurança	0,25
Navegação Web	1,5
Ligação VPN	5
Backup de dados	1,5
Web Hosting	1
Comércio electrónico	1
Gamming	5

Tabela 4 – Requisitos de largura de banda por serviço

A partir dos requisitos da Tabela 4 é possível definir as orquestrações de serviços para cada grupo de utilizadores e estimar a necessidade dos utilizadores em função dos valores de pico da largura de banda ao longo do dia.

A Tabela 5 apresenta uma possível orquestração de serviços para clientes empresariais e a largura de banda requerida em função do número de acessos simultâneo, N_{as} , aos diversos serviços por cada ponto de consumo final, considerando-se dois períodos temporais.

Serviços	Downstream (Mbps) (por dispositivo)	8h-21h		21h-8h	
		Número de acessos simultâneo	Débito (Mbps)	Número de acessos simultâneo	Débito (Mbps)
Voz	0,064	2	0,128	1	0,064
SDTV	2,5	1	2,5	0	0
HDTV	15	0	0	0	0
Partilha de arquivos e vídeo	5	5	25	1	5
Sistemas de segurança	0,25	1	0,25	1	0,25
Navegação Web	1,5	5	7,5	1	1,5
Ligação VPN	5	3	15	1	5
Backup de dados	1,5	5	7,5	7	10,5
Web Hosting	1	1	1	1	1
Comércio electrónico	1	3	3	1	1

Tabela 5 – Orquestração de serviços de utilizadores empresariais e requisitos de largura de banda em função do perfil de consumo

Em cada período temporal é determinado o valor de pico exigido pelos utilizadores em função do perfil de consumo:

- Período laboral (8h-21h) – Durante este período existe uma maior necessidade de acesso aos serviços considerados.

Através desta orquestração e do número de acessos por serviço determina-se o valor de pico exigido por cada ponto de consumo final:

$$b_{exigida_E_L} = 61,9 \text{ Mbps}$$

- Período pós laboral (21h-8h) – Durante este período existe um menor acesso aos serviços, decorrente da menor actividade empresarial.

Considerando a mesma orquestração de serviços com uma utilização menos intensiva é possível definir o valor de pico exigido por cada ponto de consumo final durante este período de tempo:

$$b_{exigida_E_pL} = 24,3 \text{ Mbps}$$

De modo similar a Tabela 6 apresenta uma possível orquestração de serviços para clientes residenciais e o valor de pico da largura de banda exigida em função do número de acessos simultâneos, N_{as} , aos diversos serviços por cada ponto de consumo final.

Serviços	Downstream (Mbps) (por dispositivo)	1h-8h		8h-17h		17h-21h		21h-1h	
		Número de acessos simultâneo	Débito (Mbps)	Número de acessos simultâneo	Débito (Mbps)	Número de acessos simultâneo	Débito (Mbps)	Número de acessos simultâneo	Débito (Mbps)
Voz	0,064	0	0	1	0,064	1	0,064	1	0,064
SDTV	2,5	1	2,5	2	5	1	2,5	1	2,5
HDTV	12	0	0	0	0	0	0	1	12
Partilha de arquivos e vídeo	6	0	0	1	6	2	12	1	6
Sistemas de segurança	0,25	1	0,25	1	0,25	1	0,25	1	0,25
Navegação Web	1,5	1	1,5	1	1,5	2	3	2	3
Ligação VPN	5	0	0	0	0	0	0	1	5
Gaming	5	0	0	0	0	1	5	1	5

Tabela 6 – Orquestração de serviços de utilizadores residenciais e requisitos de largura de banda em função do perfil de consumo

Para os utilizadores residenciais, assinalam-se quatro períodos temporais e determinam-se os respectivos valores de pico da largura de banda exigida face às expectativas de utilização em cada período de tempo considerado:

- Descanso (1h-8h) – Durante este período existe um acesso pontual aos recursos disponibilizados.

$$b_{exigida_R_Desc} = 4,25 \text{ Mbps}$$

- Diurno (8h-17h) – Este período caracteriza-se por uma utilização intermitente de serviço de televisão e de acesso à internet.

$$b_{exigida_R_D} = 12,8 \text{ Mbps}$$

- Final de Tarde (17h-21h) – Neste período existe um aumento generalizado dos diferentes serviços (Televisão, internet e gaming):

$$b_{exigida_R_FT} = 22,8 \text{ Mbps}$$

- Nocturno (21h-1h) – Este período de tempo corresponde à *busiest hour* dos utilizadores residenciais. Ocorrendo picos de utilização dos diversos serviços, (Televisão, internet, gaming, voz).

$$b_{exigida_N} = 33,8 \text{ Mbps}$$

Estimados os perfis de consumo e conhecida a variação da probabilidade de actividade, pode-se definir, para cada grupo de utilizadores, uma função característica dependente da probabilidade de actividade ($p(t)$) e da intensidade de consumo ($I(t)$):

$$\varphi(t) = [p(t), I(t)] \quad (46)$$

Desta forma define-se, para cada grupo de utilizadores:

$$\varphi_R(t) = \gamma_R \cdot \frac{p_R(t)}{p_{R,peak}} \cdot \frac{I_R(t)}{I_{R,peak}} \quad (47)$$

$$\varphi_E(t) = \gamma_E \cdot \frac{p_E(t)}{p_{E,peak}} \cdot \frac{I_E(t)}{I_{E,peak}} \quad (48)$$

Em que $\left(\frac{I(t)}{I_{peak}}\right)$, é determinada pela relação entre a largura de banda máxima exigida no período temporal considerado ($b_{exigida}$) e o valor de pico da largura de banda exigida pelos utilizadores na *busiest hour* de cada grupo de utilizadores.

O factor γ não será objecto de análise na presente dissertação.

O gráfico da Figura 60 mostra a evolução da função característica, para cada grupo de utilizadores, ao longo do dia.

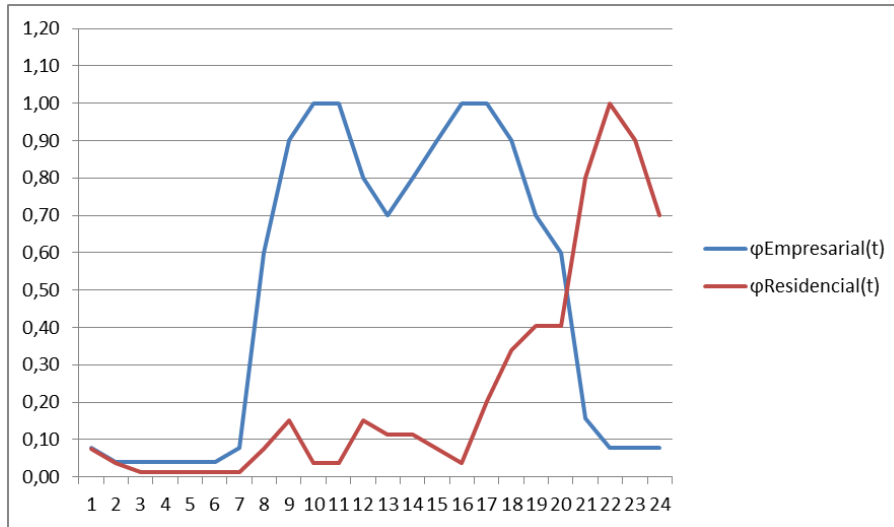


Figura 60 – Evolução das funções características ao longo do dia

A função seguinte define uma possível relação entre as duas funções características:

$$r_{E,R} = \frac{\varphi_E - \varphi_R}{\varphi_E + \varphi_R} \quad (49)$$

Note-se que:

$$r_{E,R} = \begin{cases} 1 \Rightarrow \varphi_E = 1 \text{ e } \varphi_R = 0 \\ -1 \Rightarrow \varphi_E = 0 \text{ e } \varphi_R = 1 \end{cases} \quad (50)$$

Analisando as funções (46) e (47) pode-se interpretar o seguinte:

- $\varphi = 1$, significa máxima actividade
- $\varphi = -1$, significa nenhuma actividade

A partir desta função pode-se formular uma nova função que permita à OLT, através da medição da largura de banda exigida num determinado instante de tempo, modular a largura de banda efectiva a alocar aos utilizadores empresariais, tendo como referência $b_{eff_E, border}$.

$$b_{eff_E} = b_{eff_E, border} \cdot [1 + \Delta \cdot r_{E,R}] \quad (51)$$

Desta forma é possível alterar o paradigma inicial em que b_{eff_E} assumia um valor constante em função do número de utilizadores e da largura de banda mínima garantida definida para os utilizadores empresariais ($n_E \cdot b_{min_E}$).

O factor Δ ($0 \leq \Delta \leq 1$) que não será objecto de estudo na presente dissertação permitirá ao operador impor determinadas restrições à alocação dinâmica de largura de banda efectuada pela OLT em função dos seus interesses comerciais. Saliente-se contudo que para $\Delta = 0$, $b_{eff_E} = n_E \cdot b_{min_E}$, ou seja, não existe alocação dinâmica da largura de banda efectiva.

Note-se que:

$$b_{eff_R} = b_{eff} - b_{eff_E} \tag{52}$$

O gráfico da Figura 61 mostra a variação da largura de banda alocada dinamicamente ao longo do dia a cada grupo de utilizadores. As linhas a tracejado representam a largura de banda a partir da qual é efectuada a modulação ($b_{eff_E,border}$, para o grupo empresarial e $b_{eff_R,border}$ para o grupo residencial).

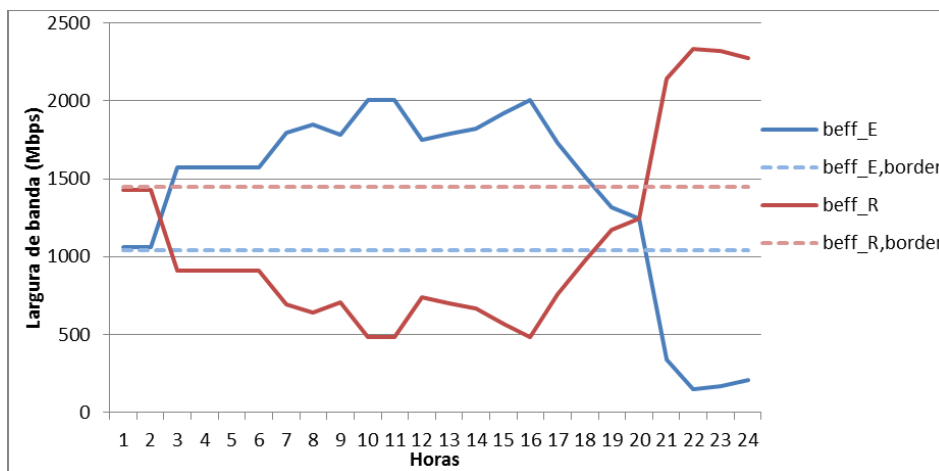


Figura 61 – Alocação dinâmica da largura de banda efectiva pelos grupos de utilizadores

Conhecida a largura de banda efectiva alocada a cada grupo de utilizadores ao longo do dia em função das características de consumo e da probabilidade de actividade, poder-se-á definir a qualidade de serviço experimentada pelos utilizadores ao longo do dia.

Recuperando a equação (11), pode-se assim medir a qualidade de experiência dos utilizadores que é determinada pela largura de banda percebida pelos utilizadores de cada grupo ao longo do dia como ilustra o gráfico da Figura 62.

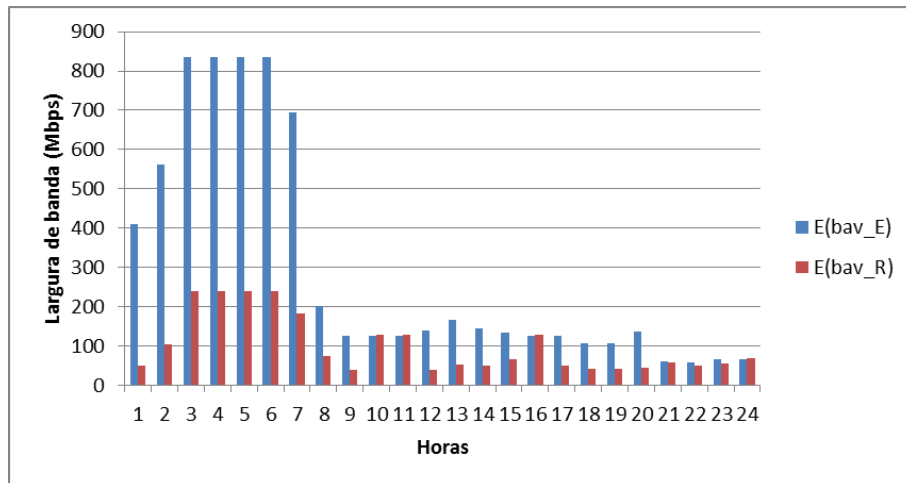


Figura 62 - Largura de banda percebida pelos utilizadores ao longo do dia

6. Análise económica e financeira – Migração ADSL-GPON

Os resultados de dimensionamento obtidos nos capítulos anteriores serão agora aplicados num exercício de análise económica aplicada a um caso específico: a transição de tecnologia ADSL para GPON numa rede de acesso.

A Figura 63 representa um modelo simplificado de uma rede ADSL.

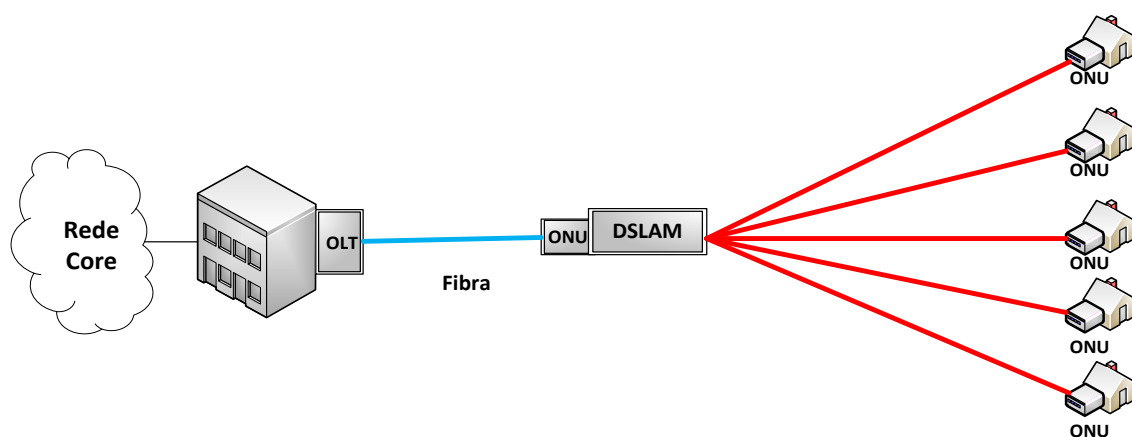


Figura 63 – Modelo simplificado de uma rede ADSL

O cenário considerado assume a existência de uma infraestrutura legada de cabos de cobre da rede telefónica, sobre a qual são fornecidos serviços de comunicação de voz e dados utilizando a tecnologia ADSL.

Note-se que o modelo simplificado da Figura 63 assume a existência de uma ligação em fibra óptica entre a OLT e o DSLAM.

Partindo deste cenário propõe-se efectuar um estudo económico e financeiro de migração para a tecnologia GPON, numa arquitectura FTTH, cuja configuração simplificada se apresenta na Figura 64.

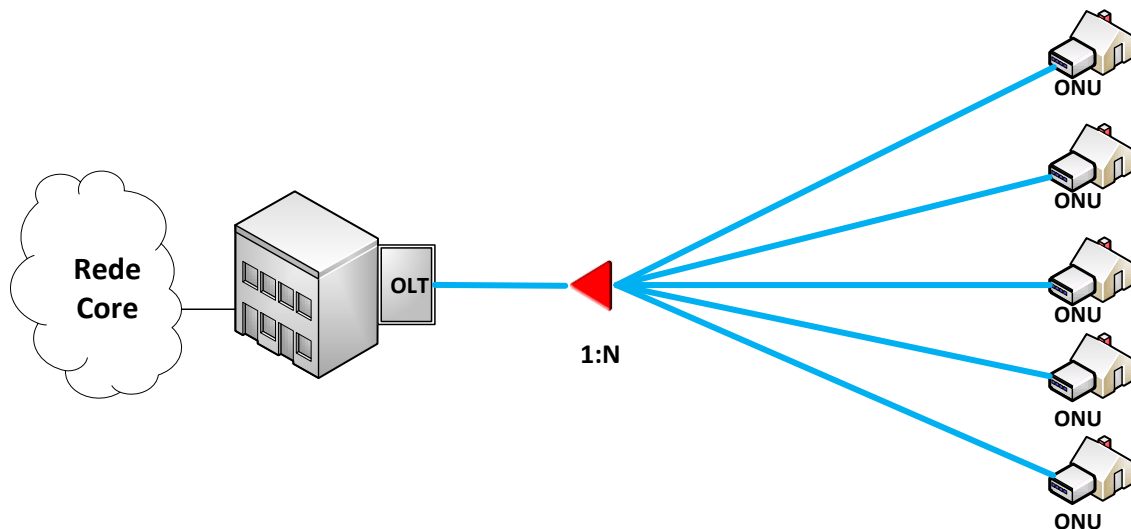


Figura 64 – Modelo simplificado de uma rede FTTH

É objecto deste *upgrade* tecnológico levar a fibra óptica até ao utilizador, instalando fibra dedicada até todos os ponto de consumo final.

Considerem-se os seguintes elementos desta arquitectura:

- Central Office – Contendo todo o equipamento indispensável para comunicar com a rede
- *Splitter* Óptico – Instalado no nó de distribuição/agregação
- Ponto de consumo final – Onde se efectua a interligação com o cliente

6.1 Elementos de Custo

Uma rigorosa análise técnico-económica pressuporia a inclusão detalhada de todos os elementos de custo que constituem os vários segmentos da rede bem como o cronograma temporal da implementação. Esse nível de detalhe está fora do âmbito deste trabalho uma vez que aquilo que se pretende é ilustrar os resultados de dimensionamento probabilístico anteriormente obtidos. Por essa razão considera-se a agregação de todos os elementos de custo, incluindo os custos de instalação, em três itens:

- **Item 1 (Instalações do utilizador)** – Equipamento no ponto de consumo final (ONU/ONT, cablagens *in-house*, etc)
- **Item 2 (Rede entre o utilizador e o *central office*)** – Trata-se de uma abstracção que representa de todos os custos entre o *central office* e o ponto de consumo final,

apresentando uma grande margem de variação em função da geografia e da densidade populacional: pontos de agregação / distribuição dos vários segmentos (*feeder, distribution, drop, etc*): cabos, condutas, conectores, *splitters* Ópticos, armários, caixas de visita, etc).

- **Item 3 (Central Office)** – Equipamento do Central Office (OLT, bastidores, cablagens, etc)

A

Tabela 7 indica os custos assumidos para cada item agregado e o respectivo rácio de capacidade (granularidade) entre os itens de material necessário para a implementação da nova rede:

	Custo (€)	Rácio
Item 1	20	1:1 (1 item 1 por cada ponto de consumo final)
Item 2	40 000	1:64 (1 Item 2 por cada 64 Items 1)
Item 3	800 000	1:56 (1 Item 3 por cada 56 Item 2)

Tabela 7 – Custo e rácios dos 3 itens considerados

A título de exemplo a Figura 65 representa uma OLT-GPON (Alcatel-Lucent 7342 ISAM FTU) onde é patente a granularidade entre OLT / cartas GPON / Portas GPON..



Figura 65 – GPON OLT Alcatel-Lucent 7342 ISAM FTU

De acordo com as características fornecidas pelo fabricante, a OLT representada na Figura 65 admite 14 *slots* (cartas) de serviço. Cada carta tem 4 portas GPON SFP, o que significa que cada slot pode servir 4 PONs. Assim, cada OLT poderá servir $4 \times 14 = 56$ splitters (item 2) e cada item 2 servirá (tipicamente) 64 pontos de consumo final (item 1).

A Figura 66 clarifica a proporção do material necessário em relação ao número de utilizadores.

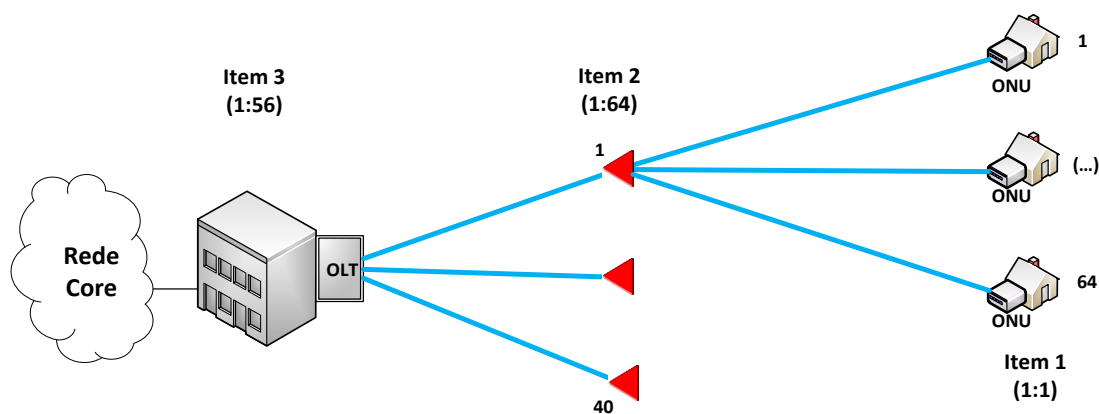


Figura 66 – Solução FTTH com itens considerados e os respectivos rácios

Com esta configuração e atendendo aos rácios admitidos é possível com uma única OLT servir 3584 pontos de consumo final.

Para que o cenário de estudo fique totalmente caracterizado, importa conhecer a dimensão do mercado e a duração do projecto.

Assumindo:

- Duração do Projecto: 15 anos;
- Dimensão do mercado: 16 000 potenciais utilizadores (4000 Empresariais e 12000 Residenciais).

6.2 Análise Económica e Financeira

Definido o cenário de estudo, foi elaborada a análise económica e financeira que se descreve nos pontos seguintes. Toda a análise efectuada no presente capítulo com base nos modelos e metodologias da referência [6].

6.2.1 Mercado

Para estimar a taxa de penetração no mercado são estudados 3 possíveis cenários:

- Optimista
- Mediano
- Pessimista

A taxa de penetração global do mercado, para uma unidade de tempo t , assumida no presente estudo, é dada pela seguinte equação [6]:

$$P(t) = P_i + \frac{P_f - P_i}{1 + \alpha \cdot e^{\beta \cdot t}} \quad (53)$$

$P(t)$ – Taxa de penetração para o instante t α – Parâmetro de controlo d momento de arranque do mercado
 P_i – Taxa de penetração inicial β – Parâmetro de controlo e velocidade de arranque do mercado
 P_f – Taxa de penetração final t – Ano para o qual se pretende saber a taxa de penetração

A partir da definição dos valores para os parâmetros α e β , das taxas de penetração inicial e final (P_i e P_f) da equação (52) é possível estimar as diferentes curvas logísticas que modelam o crescimento do mercado para cada um dos cenários considerados.

Pessimista				Mediano				Optimista			
P_i	P_f	α	β	P_i	P_f	α	β	P_i	P_f	α	β
10%	70%	4000	-1,2	10%	70%	3000	-1,5	10%	70%	2000	-1,7

Tabela 8 – Valores das variáveis para os diferentes cenários

A Tabela 9 mostra a evolução do número de utilizadores ao longo do tempo de vida do projecto para o cenário optimista de acordo com a taxa de penetração de mercado, calculada a partir da equação (52):

Ano	Taxa de Penetração	Nº de Utilizadores
1	10,2%	1632
2	10,9%	1744
3	14,5%	2320
4	28,6%	4576
5	52,6%	8416
6	65,8%	10528
7	69,2%	11072
8	69,9%	11184
9	70,0%	11200
10	70,0%	11200
11	70,0%	11200
12	70,0%	11200
13	70,0%	11200
14	70,0%	11200
15	70,0%	11200

Tabela 9 – Evolução do número de utilizadores

As curvas logísticas em “S” permitem obter uma certa percepção e controlo sobre a velocidade de penetração e a taxa de saturação de clientes. O gráfico da Figura 67 ilustra o comportamento do mercado para cada cenário ao longo do tempo.

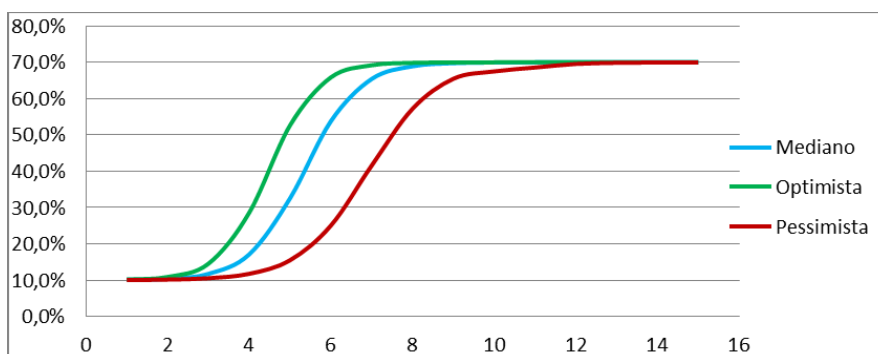


Figura 67 – Comportamento do mercado para cada cenário ao longo do tempo

A leitura das curvas em “S” que reflectem o comportamento do mercado para os três cenários considerados permite aferir o seguinte:

- Cenário Optimista: A adesão ocorre com maior intensidade nos primeiros anos, atingindo o nível de saturação (correspondente ao nível de penetração final) no nono ano do projecto, ou seja, muito antes do final de tempo de vida do projecto.
- Cenário Mediano: Nota-se um desvio face ao cenário mais optimista, ou seja, a adesão dos utilizadores ocorre mais tarde e o nível de saturação é atingido apenas no décimo primeiro ano.
- Cenário Pessimista: Reflecte um atraso maior no que respeita á adesão por parte dos utilizadores e a velocidade com que atinge o nível de saturação é também menor. Necessitando de catorze anos para atingir o ponto de saturação, ou seja, apenas um ano antes do final de tempo de vida do projecto.

6.2.2 Fluxos Financeiros

Tipicamente, a elaboração e análise de projectos de investimento pressupõe a consideração das despesas de capital, CAPEX (*Capital Expenditures*) e operacionais, OPEX (*Operating Expenditures*) bem como as receitas, o *cash flow* e o *cash balance*.

Apesar de considerados os três cenários, relativamente à evolução da taxa de penetração, as secções seguintes considerarão apenas o cenário Optimista. A análise dos outros cenários considerados far-se-ia de modo similar.

6.2.3 CAPEX

O Capex reflecte todo o investimento necessário à implementação da infraestrutura de rede, englobando todos os gasto realizados na compra, melhoramento ou extensão de vida dos activos fixos tangíveis. As necessidades de investimento ao longo do tempo de vida do projecto é determinada por:

$$Capex(t) = \sum_{i=0}^N Capex_i(t) \quad (54)$$

Reflectindo o somatório dos Capex relativos a cada um dos itens considerados.

O Capex de cada item reflecte a quantidade de materiais e equipamentos instalados, determinado pela evolução do número de utilizadores ao longo do tempo e pelo rácio associado ao item em análise.

Refira-se que o investimento inicial se considera concretizado no “Momento 0”, ou seja, antes do início da actividade económica. Nesse momento é realizado o investimento necessário para o arranque do projecto, por forma a que no primeiro ano de exercício económico se possa fornecer serviço aos clientes pretendidos (de acordo com a taxa de penetração inicial definida). Considerado a evolução do número de utilizadores ao longo dos anos, determinou-se a quantidade de material necessário para cada ano do projecto em função do rácio admitido para cada item (Tabela 7). Os resultados são apresentados na Tabela 10.

Ano	Item 1	Item 2	Item 3
1	1.626	26	1
2	1.742	28	1
3	2.328	37	1
4	4.574	72	2
5	8.423	132	3
6	10.536	165	3
7	11.071	173	4
8	11.176	175	4
9	11.196	175	4
10	11.199	175	4
11	11.200	175	4
12	11.200	175	4
13	11.200	175	4
14	11.200	175	4
15	11.200	175	4

Tabela 10 - Material necessário em cada ano

Note-se que estes valores são arredondados por excesso, pois sempre que um item excede a sua capacidade é obrigatória a aquisição de um novo equipamento para poder fornecer serviço a novos utilizadores.

A Tabela 11 apresenta as necessidades de investimento ao longo do projecto, discriminadas por item.

Ano	Item 1	Item 2	Item 3
1	32.520 €	104.000 €	800.000 €
2	2.320 €	80.000 €	- €
3	11.720 €	360.000 €	- €
4	44.920 €	1.400.000 €	800.000 €
5	76.980 €	2.400.000 €	800.000 €
6	42.260 €	1.320.000 €	- €
7	10.700 €	320.000 €	800.000 €
8	2.100 €	80.000 €	- €
9	400 €	- €	- €
10	60 €	- €	- €
11	20 €	- €	- €
12	- €	- €	- €
13	- €	- €	- €
14	- €	- €	- €
15	- €	- €	- €

Tabela 11 – Investimento anual discriminado por item

A variação do investimento necessário em cada ano do projecto depende da adesão de novos utilizadores. A partir da informação, discriminada por item, da Tabela 11 calcula-se o valor total de investimento por cada ano.

O gráfico da Figura 68 representa a evolução do investimento global por cada ano do projecto para os 3 cenários considerados.

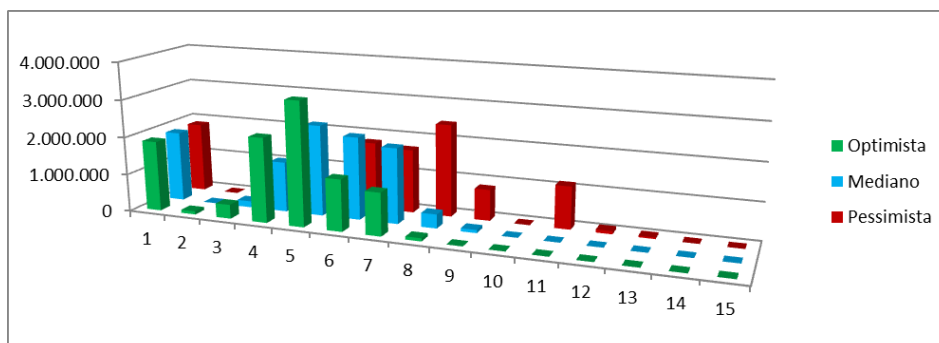


Figura 68 – Investimento por ano de projecto para os 3 cenários

A análise da Figura 68 permite verificar que existe semelhança de Capex, e que a sua variação é condicionada pela evolução do mercado. O Capex inicial é praticamente igual nos 3 cenários e o pico de investimento do projecto ocorre, em cada cenário, no momento de explosão do mercado. No caso do cenário optimista, o pico de investimento ocorre mais cedo que nos restantes cenários.

Por forma a obter uma visão mais realista do investimento que é necessário realizar ao longo do tempo de duração do projecto, importa conhecer a evolução do investimento, ao longo dos anos. Para tal construiu-se a Tabela 12 considerando o investimento acumulado, com uma taxa fixa de 10 % para a depreciação, de acordo com a formulação seguinte:

$$IAD(t) = IA(t) + IAD(t-1) \cdot (1 - TD) = \sum_{k=0}^t IA(k) \cdot (1 - TD)^{t-k} \quad (55)$$

Em que:

$IAD(T)$ = Investimento acumulado depreciado no ano t ,

$IA(t)$ = Investimento anual correspondente ao ano t ,

TD = Taxa de depreciação considerada (10% ao longo de todo o projecto).

Ano	Investimento acumulado (depreciado)
1	1.872.524 €
2	1.686.048 €
3	1.681.760 €
4	2.050.749 €
5	4.255.116 €
6	6.817.526 €
7	7.333.001 €
8	7.770.876 €
9	7.076.477 €
10	6.369.440 €
11	5.732.633 €
12	5.159.400 €
13	4.643.467 €
14	4.179.122 €
15	3.761.210 €

Tabela 12 – Investimento acumulado (depreciado)

6.2.4 OPEX

O Opex reflecte todo o investimento necessário à manutenção da infraestrutura de rede, englobando todos os gastos operacionais ao longo do tempo de vida da rede.

No presente estudo, o Opex corresponde a uma percentagem (K_1) do Capex acumulado no instante t , ($Capex_{acc}(t)$), ao qual se adiciona um custo fixo por utilizador (K_2), multiplicado pelo número de utilizadores no instante t , ($N_{utilizadores}(t)$) e um custo fixo por 1 Gbps na ligação da OLT à rede core (K_3) multiplicado pela capacidade de cada PON (C_{core}) e pelo número de portos da OLT necessários em cada fase do projecto ($N_{utilizadores}(t)/N$):

$$Opex(t) = K_1 \cdot Capex_{acc}(t) + K_2 \cdot N_{utilizadores}(t) + K_3 \cdot C_{core} \cdot \frac{N_{utilizadores}(t)}{N} \quad (56)$$

A capacidade necessária para interligar a OLT à rede *core* (C_{core}) é determinada pelo número total de utilizadores servidos pela PON em função da largura de banda mínima que lhes é garantida e o valor médio da probabilidade de actividade, \bar{p} , ao longo do dia:

$$C_{core} = N \cdot \bar{p} \cdot b_{min} \quad (57)$$

Na situação em que coexistam na mesma PON mais do que um grupo de utilizadores:

$$C_{core} = [(n_1 \cdot \bar{p}_1 \cdot b_{min_1}) + (n_2 \cdot \bar{p}_2 \cdot b_{min_2}) + \dots + (n_i \cdot \bar{p}_i \cdot b_{min_i})] \quad (58)$$

Para o cenário considerado em que coexistem dois grupos de utilizadores na mesma PON:

- 16 utilizadores empresariais, com $\bar{p}_E = 0,53$;
- 48 utilizadores residenciais, com $\bar{p}_R = 0,37$;

$$C_{core} = [(n_E \cdot \bar{p}_E \cdot b_{min_E}) + (n_R \cdot \bar{p}_R \cdot b_{min_R})] = 1073,2 \text{ Mbps} \quad (59)$$

Atendendo que cada PON alimenta um único nó da rede, o número de portos da OLT necessários, corresponde ao valor determinado para o item 2 em cada fase do projecto.

Assumindo, $K_1 = 10\%$, $K_2 = 100\text{€}$ e $K_3 = 15\text{€/Gigabit}$ construiu-se a Tabela 13 para o cenário Optimista:

Ano	Opex
1	350.291 €
2	351.377 €
3	429.617 €
4	859.740 €
5	1.533.213 €
6	1.812.349 €
7	1.903.518 €
8	1.842.890 €
9	1.772.635 €
10	1.707.981 €
11	1.649.530 €
12	1.596.876 €
13	1.548.480 €
14	1.506.821 €
15	1.468.427 €

Tabela 13 – Opex do cenário Optimista

O gráfico da Figura 69 mostra a evolução do Opex ao longo do projecto.

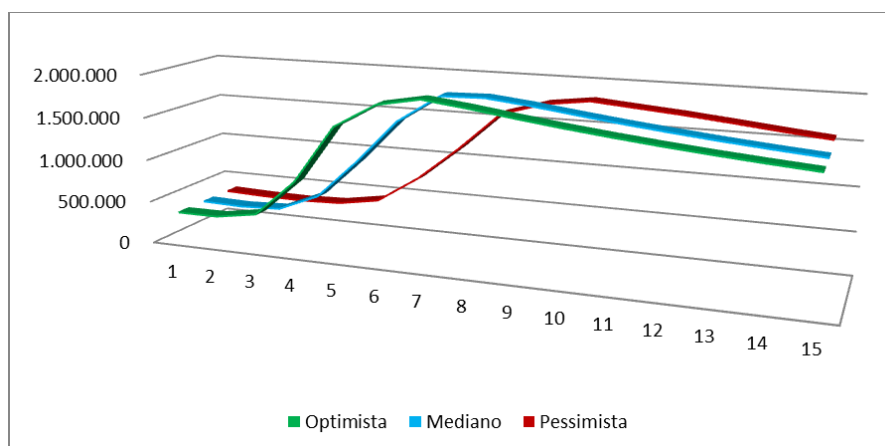


Figura 69 – Evolução do Opex para os três cenários

No presente estudo verifica-se que o Opex estimado para o cenário optimista é mais elevado, fortemente condicionado pelo facto de o número de utilizadores neste cenário atingir o nível de saturação mais rapidamente.

6.2.5 Receitas

O rendimento do projecto de investimento advém do pagamento de um valor mensal por parte do cliente pelo acesso aos serviços disponibilizados pelo operador. Refira-se que uma das primeiras acções de marketing dos operadores está relacionada com os tarifários, criando geralmente vantagens para novos aderentes. Este facto tem como objectivo além de ganhar quota de mercado, diminuir o período de recuperação do investimento.

Para o cálculo das receitas foi estimado um custo médio mensal do serviço de triple play, para os dois tipos de clientes considerados (Tabela 14):

Serviço	Optimista	Mediano	Pessimista
Empresarial	100 €	80 €	70 €
Residencial	45 €	40 €	30 €

Tabela 14 – Custos mensais

Ao qual se aplicou uma taxa de erosão de 5%. Assim:

$$\begin{aligned}
 \text{Receitas}(t) = & \left(n_E(t) \cdot \left(\text{Custo}_{\text{Serviço}} \cdot (1 - \text{Taxa}_{\text{Erosão}}) \right) \right) \\
 & + \left(n_R(t) \cdot \left(\text{Custo}_{\text{Serviço}} \cdot (1 - \text{Taxa}_{\text{Erosão}}) \right) \right)
 \end{aligned} \tag{60}$$

A Tabela 15 ilustra as receitas previstas, considerando o cenário Optimista, ao longo do tempo do projecto.

Ano	Custo Anual p/Cliente Empresarial (Erosão = 5%)	Custo Anual p/Cliente Residencial (Erosão = 5%)	Receitas
1	1.200 €	540 €	1.146.473 €
2	1.140 €	513 €	1.166.507 €
3	1.083 €	487 €	1.480.985 €
4	1.029 €	463 €	2.764.988 €
5	977 €	440 €	4.836.905 €
6	929 €	418 €	5.747.396 €
7	882 €	397 €	5.737.625 €
8	838 €	377 €	5.502.374 €
9	796 €	358 €	5.236.334 €
10	756 €	340 €	4.976.096 €
11	718 €	323 €	4.727.566 €
12	683 €	307 €	4.491.235 €
13	648 €	292 €	4.266.681 €
14	616 €	277 €	4.053.349 €
15	585 €	263 €	3.850.682 €

Tabela 15 – Receitas em função dos custos Anuais devidos aos clientes Empresariais e residenciais

O gráfico da Figura 70 ilustra a variação das receitas ao longo do tempo de projecto em função dos custos mensais para os clientes empresariais e residenciais considerando os diferentes cenários.

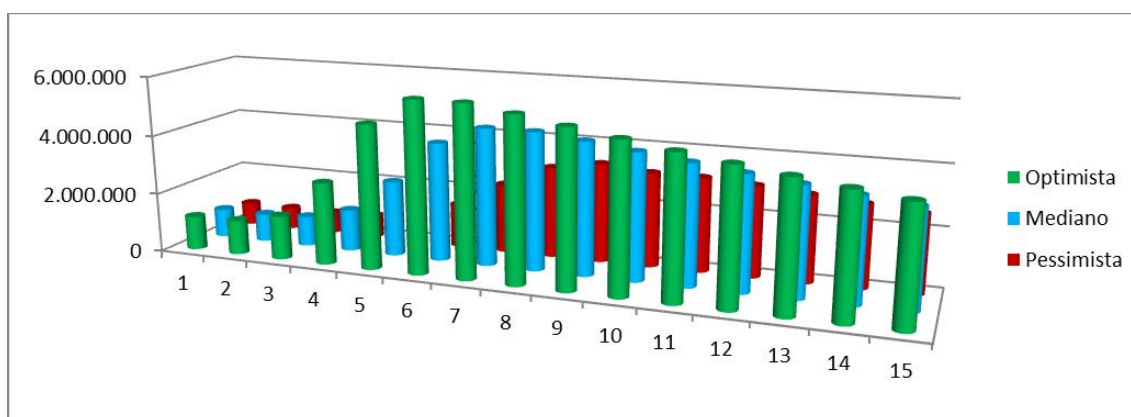


Figura 70 – Receitas ao longo do tempo de projecto em função dos 3 cenários

6.2.5.1 Cash-Flow

O *cash-flow* indica os fluxos de caixa, ou seja, corresponde à soma das receitas e despesas (Capex e Opex), ao longo de um período de tempo definido.

Para o cálculo do *cash-flow* consideram-se ainda os resultados antes de impostos e as amortizações (RAI) e amortizações. Contudo, estes parâmetros não foram considerados neste exercício económico uma vez que foram ignorados os impostos sobre os lucros.

Conhecidos os valores do Opex, Capex e das receitas ao longo dos diferentes anos do projecto de investimento, determina-se o *cash-flow* líquido em cada ano de exercício económico:

$$C_{flow}(t) = [Capex_{acc}(t) + Opex(t)] + Receitas(t) \quad (61)$$

O valor acumulado dos vários *cash-flows* permite efectuar o balanço do investimento ao longo do período de tempo considerado (*cash-balance*):

$$C_{balance}(t) = \int_0^K C_{flow}(t) dt \quad (62)$$

A Figura 71 ilustra a evolução do balanço para os três cenários considerados ao longo do período do projecto.

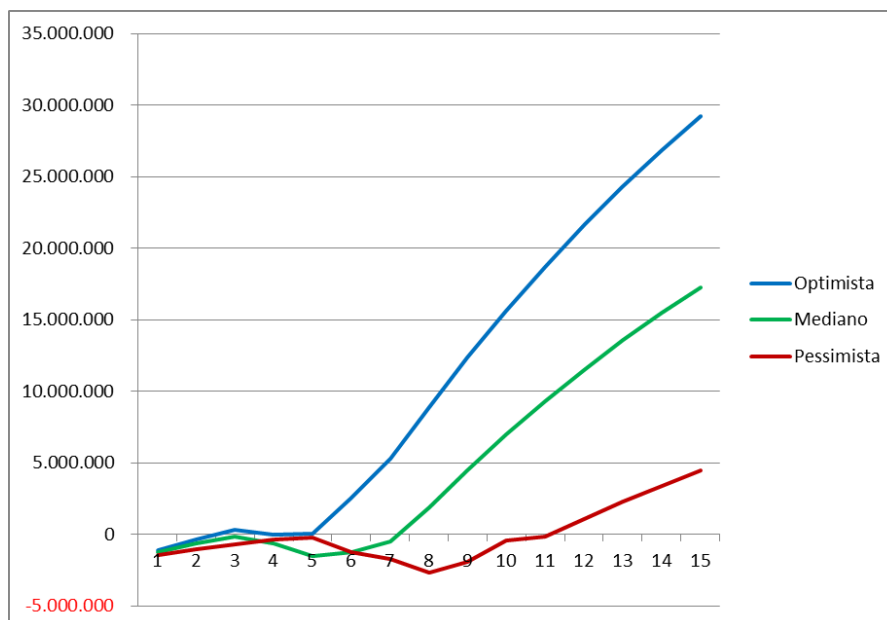


Figura 71 – Balanço dos três cenários

6.2.5.2 Análise de Resultados

A análise ao gráfico da Figura 72 permite-nos concluir o seguinte:

- A análise do Balanço (*cash flow balance*) permite-nos verificar que a partir do quinto ano do projecto se inicia a recuperação do investimento e no início do sétimo ano atinge-se o ponto de equilíbrio (*break even*), ou seja, é a partir deste ano que o projecto começa a ser rentável.
- Note-se que a partir do segundo o *cash flow* do projecto (receitas líquidas) apresenta já valores positivos.
- Verifica-se ainda que o Capex atinge o pico de investimento no quinto ano e a partir do sétimo ano ele tem um valor residual, o que significa que foi realizado todo o investimento necessário à implementação da infraestrutura de rede capaz de servir os potenciais utilizadores. Note-se uma vez mais que é no sétimo ano que se atinge o *break even*.

- O Opex, como seria de esperar, tem uma tendência de crescimento ao longo dos primeiros anos sete anos. A partir do sétimo ano apresenta uma ligeira tendência de redução apresentando no ano quinze um valor que corresponde a 3/4 do valor máximo do Opex, atingido no sétimo ano.

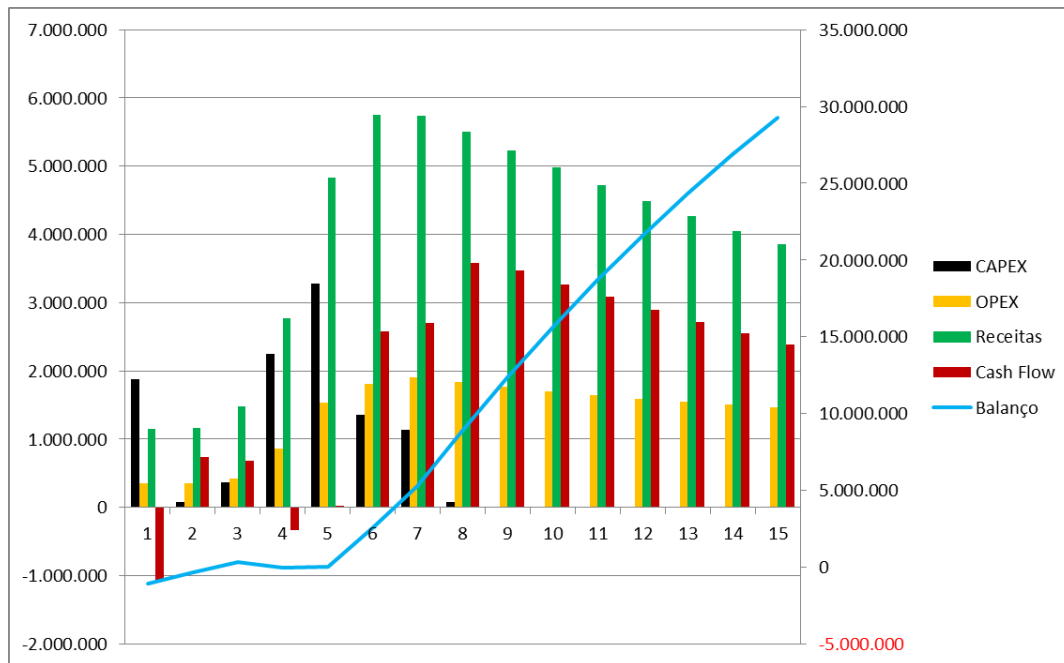


Figura 72 – Representação de todos os resultados (cenário Optimista)

Para aferir a viabilidade de um projecto de investimento, devem-se analisar os seguintes indicadores:

- **Valor Actual Liquido (VAL)** – Determina o valor actual (valor hoje de um determinado montante a obter no futuro) de todos os *cash-flows* em função da Taxa de Actualização (*TA*) definida

$$VAL = \sum_{i=0}^n \frac{C_{flow}(i)}{(1 + TA)^i} \quad (63)$$

Se $VAL > 0$, o projecto é viável e permite recuperar o investimento realizado e remunerar os capitais investido à taxa definida. Se $VAL < 0$ o projecto não é economicamente viável.

- **Taxa Interna de Rentabilidade (TIR)** – Representa a taxa máxima de rentabilidade do projecto. Ou seja, é a taxa de actualização que, no final do período de vida do projecto iguala o *VAL* a zero.

Se $TIR > TA \Rightarrow VAL > 0$, o projecto tem uma taxa de rentabilidade superior ao custo de oportunidade de capital e é economicamente viável.

Se $TIR < TA \Rightarrow VAL < 0$, o projecto não gera uma taxa de rentabilidade superior ao custo de oportunidade de capital sendo economicamente inviável.

- **Período de Recuperação (Payback)** – Corresponde ao período de tempo necessário para recuperar um determinado investimento inicial.

Para o cálculo destes indicadores considerou-se uma taxa de actualização de 5%. Os valores obtidos para cada um dos cenários estão representados na Tabela 16.

	Optimista	Mediano	Pessimista
VAL	17.775.096,77 €	9.950.568,58 €	1.902.534,17 €
TIR	71%	43%	15%
Payback	4	3	11

Tabela 16 – Resultados dos indicadores económicos

7. Considerações Finais

O presente capítulo expõe as principais conclusões do trabalho efectuado e apresenta sugestões para trabalhos futuros a partir dos aspectos abordados na presente dissertação.

7.1 Conclusões

A presente dissertação partiu de uma caracterização evolutiva das redes de Telecomunicações ao nível da infraestrutura física e das tecnologias que as suportam, com particular enfoque nos aspectos de planeamento e dimensionamento na rede de acesso. Neste sentido foi desenvolvido um método de dimensionamento de capacidade de redes GPON de acordo com a aleatoriedade de actividade dos utilizadores.

Assumindo que a simultaneidade do acesso dos utilizadores aos recursos da rede é determinada pela distribuição binomial em função do factor de actividade dos utilizadores, p , definiu-se um modelo de cálculo que permite, a partir da largura de banda efectiva, determinar duas métricas importantes para o planeamento de redes PON: (i) a largura de banda média percebida pelo conjunto dos utilizadores activos, $(E(b_{av}))$, e (ii) a partir de um processo ergódico determinar a percentagem de tempo durante a qual se garante uma determinada largura de banda a um certo número de utilizadores simultaneamente activos, (P_{av}) , ou seja, medir a qualidade de serviço experimentada pelo conjunto de utilizadores activos.

Este modelo combinatório foi extrapolado a um cenário de estudo em que coexistem na mesma PON dois tipos de utilizadores com diferentes graus de exigência (ou seja, diferentes valores de P_{av}) e diferentes probabilidades de actividade. Neste cenário, a largura de banda efectiva disponibilizada pela OLT é dividida pelos dois grupos de utilizadores em função do número total de utilizadores do grupo com maior requisito de P_{av} , e da largura de banda mínima garantida, (b_{min}) , pelo operador a esses utilizadores. Sendo a largura de banda disponível por utilizador definida pelo quociente entre a largura de banda mínima garantida e a probabilidade de actividade.

O cenário de estudo permitiu ainda avaliar a aplicabilidade do modelo ao longo de uma série temporal, caracterizada pela variação da probabilidade de actividade, e estimar a quantidade de largura de banda não utilizada (b_{extra}) , que permite ao operador efectuar uma gestão da largura de banda disponível por utilizador em função dos seus interesses comerciais.

Por fim definiu-se ainda uma equação característica dependente da probabilidade de actividade e da intensidade de consumo que permite, através da modulação da largura de banda efectiva, fazer uma gestão dinâmica da largura de banda a alocar a cada um dos grupos de utilizadores.

Para além do estudo de dimensionamento de capacidade foi ainda efectuada uma análise técnico-económica da evolução das redes fixas baseadas em cobre e tecnologia ADSL para GPON numa arquitectura FTTH. Através deste estudo foram efectuadas previsões de custo e receitas geradas pelo projecto de investimento e calculados os indicadores de viabilidade, TIR, VAL e *payback period*, que demonstraram a viabilidade do investimento, mesmo assumindo o cenário mais pessimista.

Para além dos estudos realizados na presente dissertação, surgiram aspectos de particular relevância que, devido às limitações temporais não foram possíveis detalhar com o merecido detalhe.

7.2 Trabalho Futuro

Apresentam-se algumas sugestões sobre possíveis trabalhos futuros na óptica do planeamento e dimensionamento de capacidade que poderão ajudar a consolidar o trabalho até aqui efectuado:

- Alargar a abordagem combinatória utilizada, particularmente à tecnologia NG-PON2.
- Integrar esta abordagem num algoritmo de gestão de largura de banda dinâmica para downstream (downstream DBA).
- Introduzir a aleatoriedade espacial relativa aos locais em que os utilizadores se tornam clientes da infraestrutura.
- Aprofundar o estudo sobre a largura de banda não utilizada a cada instante, por forma a melhor gerir a largura de banda disponível.
- Reflectir o trabalho de análise probabilística no cálculo do Capex.

8. Referências Bibliográficas

- [1] A. M. d. O. Duarte, “Rede e Serviços de Telecomunicações: Conceitos, Modelos e Estruturas Fundamentais das Redes de Telecomunicações,” Aveiro, 2009.
- [2] A. M. de Oliveira Duarte, “FTTh: Tecnologias, Soluções, Cenários e Análise Económica,” 2014.
- [3] M. C. R. Tafal, *Otimização e Planeamento de Redes OTN para Transporte de Tráfego Ethernet*, IST, 2013.
- [4] ANACOM, “Evolução dos acessos à Internet em Portugal,” 2015.
- [5] S. C. A. Manuel Oliveira Duarte, “Fibra óptica na Rede de Acesso: Tecnologias e soluções,” Aveiro, 2009.
- [6] A. M. d. O. Duarte, “Elementos de Análise Técnico-Económica - notas de estudo,” Aveiro, 2010.
- [7] L. Alveirinho, “Evolução das Redes de Acesso para Suporte a Serviços de Nova Geração,” em *Seminário ANACOM*, Lisboa, 2006.
- [8] H. Laboratories, “Analog Telephony Compliance Requirements Overview,” 2009.
- [9] E. H. Watanabe, “Grupo de Teleinformática e Automação,” [Online]. Available: http://www.gta.ufrj.br/grad/02_2/xdsl/. [Acedido em 24 01 2016].
- [10] “<http://educypedia.karadimov.info/computer/ADSL.gif>,” 15 Abril 2016. [Online].
- [11] [Online]. Available: http://www.broadbandspeedchecker.co.uk/guides/adsl_and_distance.aspx. [Acedido em 21 Janeiro 2016].
- [12] NewTel, “Powerful HDSL Copper Extension Solution,” [Online]. Available: <http://www.newtel.lv/rus/wired/hdsl/index.html>. [Acedido em 10 07 2016].
- [13] S. Haas, “EE Times,” 9 Março 2002. [Online]. Available: <http://www.eetimes.com>. [Acedido em 20 Dezembro 2015].
- [14] MetroDane Communications, LLC, [Online]. Available: <http://www.metrodane.com/services.html>. [Acedido em Abril 2016].
- [15] S. C. N. Lopes, *Fibra óptica na Rede de Acesso: Cenários de Evolução*, Universidade Aveiro, 211.
- [16] ANACOM, “A Evolução das NGN,” 2011.
- [17] J. U. Sverzut, *Redes GSM, GPRS, EDGE e UMTS*, S. Paulo: Erica, 2005.
- [18] J. M. Benzinho, *Avaliação Económica de Redes FTTH em Diferentes Cenários Geográficos*, 2011.
- [19] D. C. Carrilho, *Redes Híbridas de Acesso Fixo sem Fios: Análise*, Aveiro, 2011.

- [20] C. Santos, *Redes de Acesso Avançadas*, Universidade de Aveiro, 2012.
- [21] L. D. Heyn, "Comsof," [Online]. Available: <http://www.comsof.com/blog/towards-an-optimized-regulation-of-access-networks>. [Acedido em 26 Janeiro 2016].
- [22] T. Rand-NASH, *Characterizing Capital and Operational Tradeoffs Resulting from Fiber-To-The-Home Optical Network Architecture Choice*, Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [23] Chang-Lee, W. V. Solrin e B. Y. Kim, "Fiber to the Home Using a PON Infrastructure," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, p. 12, 2006.
- [24] Ericsson, "Full Service Broadband with GPON," 2008.
- [25] C. C. Bruno Veloso, *An overview of GPON in the Access Network*, Aveiro, 2014.
- [26] Huawei Technologies, *GPON Fundamental*, 2008.
- [27] AlticeLabs, *Evolution of FTTH Networks for NG-PON2*, 2013.
- [28] Huawei, *Nest-Generation PON Evolution*, 2014.
- [29] ITU-T Recommendation G.984.2, Series G: Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification, 2003.
- [30] ITU-T Recommendation G.984.1, Series G: Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General characteristics, 2008.
- [31] "SARDANA Project," [Online]. Available: <http://www.ict-sardana.eu/>. [Acedido em 1 07 2017].
- [32] A. P. Rohn Heron, *TWDM-PON: Taking Fiber to News Wavelenghts*, Alcatel-Lucent, 2014.
- [33] D. Nettet, "NG-PON2 Technology and Standards," *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 5, pp. 1136-1143, 2015.
- [34] ITU-T Recommendation G.984.1: 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification, 2014.
- [35] G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, McGraw-Hill, 2000.
- [36] E. Kubilinskas, "Design of Multi-layer Telecommunication Networks, Fairness, Resilience, and Load Balancing," Lund, 2008.
- [37] JDSU, *Pocket Guide - Synchronous Digital Hierarchy*.
- [38] J. C. a. P. T.Starr, *Understanding Digital Subscriber Line Technology*, Prentice-Hall, 1999.
- [39] M. L. e. P. A. António Teixeira, *Slides de comunicações Ópticas*, 2011.
- [40] M. M. Al-Quzwini, "Design and implementation of a fiber to the Home FTTH Access based on GPON," *International Journal of Computer Applications*, vol. 92, 2014.
- [41] FTTH Council, 2011.
- [42] S. M. Ricardo Cruz, *Análise Tecno-Económica de Redes Heterogéneas com Qualidade de*

Serviço, Aveiro, 2002.

[43] J. Pires, *Sistemas e Redes de Telecomunicações*, IST, 2006.

[44] TechnologyUK, "TechnologyUK," [Online]. Available: <http://www.technologyuk.net/>.
[Acedido em 18 Abril 2016].

[45] J. A. H. J. M. G. D. L. Rafael Sánchez, "Provisioning 1 Gb/s Symmetrical Services with Next-Generation Passive Optical Network Technologies," *IEEE Communications Magazine*, Fevereiro 2016.