



**Estudo e implementação de uma infraestrutura de telecomunicações  
para experimentação laboratorial**

**JOÃO PEDRO OLIVEIRA LOUREIRO**

**Aluno nº A039056**

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores pelo Instituto Superior de  
Engenharia do Porto

Relatório de Projeto submetido ao Departamento de Ciências da Comunicação  
e Tecnologias da Informação da Universidade da Maia, para  
satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Tecnologias da  
Informação, Comunicação e Multimédia – Ramo Telecomunicações

Relatório de Projeto realizado sob a supervisão do Mestre Mário Paulo  
Monteiro Serrão, do Departamento de Ciências da Comunicação e  
Tecnologias da Informação da Universidade da Maia

Maia, janeiro de 2023

## Resumo

A necessidade de acesso a serviços digitais com maior débito e melhor qualidade de serviço, por parte de assinantes residenciais ou empresariais, traduz-se no facto das redes de comunicação óticas serem neste momento, o foco dos operadores de telecomunicações. Aliado a este aspeto, os serviços que as redes de acesso de nova geração são capazes de oferecer, como conteúdos multimédia e voz por IP numa infraestrutura convergente, justifica a eleição por parte dos operadores de telecomunicações em Portugal, das redes óticas passivas (PON) como tecnologia de acesso, mais concretamente recorrendo à vertente *Gigabit Passive Optical Network* (GPON).

Estes serviços devem, no entanto, ser transportados ao longo da rede do operador de forma tão eficaz quanto possível, necessitando para isso de uma tecnologia capaz de ser escalável e de suportar um grande número de utilizadores e serviços, ao mesmo tempo que possibilita o uso eficiente da largura de banda necessária para os proporcionar, sendo que uma das opções de eleição ao nível da rede de transporte, é o *Multiprotocol Label Switching* (MPLS).

O trabalho apresentado pretende realizar uma abordagem teórica aos mecanismos utilizados pelos operadores de telecomunicações, tanto na rede de acesso como na rede de transporte, sendo que nesse sentido, são descritas diversas tecnologias e protocolos que são tecnicamente capazes de na atualidade, disponibilizar este tipo de serviços com resiliência, fiabilidade e segurança.

No ensino em geral, e em particular na área de estudos em que este trabalho se insere, a componente prática pode ter inúmeras vantagens para o aluno, como por exemplo a capacidade de resolver problemas, ou até mesmo a motivação e a confiança nas suas capacidades, sendo para isso necessário providenciar, para além dos equipamentos e materiais, as infraestruturas necessárias para o efeito. Nesse sentido, este projeto pretende ser uma ferramenta para apoio ao estudo experimental das redes de transporte e acesso, ao nível dos operadores de telecomunicações.

**Palavras-Chave:** PON, Serviços de acesso, Serviços de transporte



# Abstract

The need for access to digital services with higher speed and better quality of service, by residential or business subscribers, is reflected in the fact that optical communication networks are currently the focus of telecommunications operators. Allied to this aspect, the services that the new generation access networks can offer, such as multimedia content and voice over IP in a converged infrastructure, justifies the choice by the telecommunications operators in Portugal of Passive Optical Networks (PON) as an access technology, more specifically using the Gigabit Passive Optical Network (GPON) component.

These services must, however, be carried over the operator's network as efficiently as possible, requiring a technology capable of being scalable and supporting a large number of users and services, while ensuring the highly efficient use of network bandwidth needed to provide them, being one of the options of choice at the network transport level the Multiprotocol Label Switching (MPLS).

This work intends to carry out a theoretical approach to the mechanisms used by telecommunications operators, both in the access and in the transport network, and in these terms, several technologies and protocols are described that are currently technically capable of providing this type of service. with resilience, reliability and secure.

In education, and in particular in the field of study in which this work belongs, the practical component can have numerous advantages for the student, such as the ability to solve problems, or even motivation and confidence in their abilities, for which it is necessary to provide, in addition to equipment and materials, the necessary infrastructure for this purpose. In this sense, this project intends to be a tool to support the experimental study of transport and access networks, at the level of telecommunications operators.

**Palavras-chave:** PON, Access Services, Transport Services

# Índice

<b>RESUMO .....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>I</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS .....</b>	<b>V</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....	2
1.3 CALENDARIZAÇÃO.....	3
1.4 METODOLOGIAS E RECURSOS .....	4
1.5 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO.....	5
<b>2 TECNOLOGIAS E REDES DE TELECOMUNICAÇÕES .....</b>	<b>6</b>
2.1 REDES DE TELECOMUNICAÇÕES .....	6
2.1.1 <i>Hierarquia</i> .....	6
2.1.2 <i>Fibra ótica</i> .....	7
2.2 TECNOLOGIAS DE TRANSPORTE.....	7
2.2.1 <i>Multiprotocol Label Switching (MPLS)</i> .....	7
2.2.1.1 Label Distribution Protocol .....	8
2.2.1.2 Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering .....	9
2.2.1.3 Segment Routing .....	9
2.2.2 <i>Wavelength Division Multiplexing (WDM)</i> .....	10
2.3 SERVIÇOS DE TRANSPORTE .....	11
2.3.1 <i>Virtual Private LAN Service (VPLS)</i> .....	12
2.3.2 <i>Virtual Private Wire Service (VPWN)</i> .....	13
2.3.3 <i>Virtual Private Routed Network (VPRN)</i> .....	13
2.3.4 <i>Ethernet Virtual Private Network (EVPN)</i> .....	14
2.4 TECNOLOGIAS DE ACESSO .....	17

2.4.1	<i>Ethernet Ativa</i> .....	17
2.4.2	<i>PON</i> .....	18
2.4.2.2	TDM-PON .....	20
2.5	SERVIÇOS DE ACESSO .....	24
2.5.1	<i>Residencial</i> .....	24
2.5.2	<i>Empresarial</i> .....	25
2.5.3	<i>Setor público</i> .....	26
<b>3</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>27</b>
	<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS</b> .....	<b>28</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 Diagrama geral .....	2
Figura 2 Diagrama de <i>Gantt</i> .....	4
Figura 3 Arquitetura segundo o modelo hierárquico.....	6
Figura 4 Domínio MPLS .....	8
Figura 5 Esquema de sistema de transmissão WDM [7].....	11
Figura 6 Serviço VPLS entre dois sites .....	12
Figura 7 Serviço VPWS entre dois sites.....	13
Figura 8 Serviço VPRN entre dois sites .....	14
Figura 9 EVNP-MPLS .....	16
Figura 10 EVPN-VXLAN .....	16
Figura 11 Arquiteturas e tecnologias de redes FTTH ponto-multiponto [11].....	17
Figura 12 Arquitetura ponto-multiponto <i>ethernet</i> ativa [11].....	18
Figura 13 Rede PON ponto-multiponto com fator de <i>splitting</i> de 1:N .....	19
Figura 14 RF Overlay em uma arquitetura PON [15], [16].....	20
Figura 15 Transmissão EPON <i>upstream</i> e <i>downstream</i> .....	22
Figura 16 Transmissão GPON <i>upstream</i> e <i>downstream</i> .....	23

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 Calendarização do projeto .....	3
Tabela 2 – Tipos de Rotas EVPN.....	15
Tabela 3 EPON vs GPON [21].....	24

## Lista de Acrónimos

<b>ADSL</b>	Asymmetric Digital Subscriber Line
<b>BGP</b>	Border Gateway Protocol
<b>CAT</b>	Centro Avançado de Telecomunicações
<b>DBA</b>	Dynamic Bandwith Allocation
<b>EDFA</b>	Erbium-Doped Fiber Amplifier
<b>EYDFA</b>	Erbium Yterbium Doped Fiber Amplifier
<b>EPON</b>	Ethernet Passive Optical Network
<b>EVPN</b>	Ethernet Virtual Private Network
<b>FDB</b>	Forwarding Database
<b>FEC</b>	Forwarding Equivalence Class
<b>FTTH</b>	Fiber To The Home
<b>FTTx</b>	Fiber To The x
<b>GEM</b>	GPON Encapsulation Method
<b>GPON</b>	Gigabit Passive Optical Network
<b>HSI</b>	High Speed Internet
<b>IGP</b>	Interior Gateway Protocol
<b>ISP</b>	Internet Service Provider
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>IPTV</b>	Internet Protocol Television
<b>ITU</b>	International Telecommunication Unit – Telecommunication
<b>LDP</b>	Label Distribution Protocol
<b>LER</b>	Label Edge Router
<b>LSP</b>	Label Switched Path
<b>LSR</b>	Label Switching Router
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>MPCP</b>	Multipoint Control Protocol
<b>MPLS</b>	Multiprotocol Label Switching
<b>OLT</b>	Optical Line Terminal
<b>ONT</b>	Optical Network Terminal
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection

<b>OSPF</b>	Open Shortest Path First
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>UMAIA</b>	Universidade da Maia
<b>P</b>	Provider
<b>PE</b>	Provider Edge
<b>PON</b>	Passive Optical Network
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RSVP-TE</b>	Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering
<b>SAP</b>	Service Access Point
<b>SDP</b>	Service Distribution Point
<b>SLA</b>	Service-Level Agreement
<b>SR</b>	Segment Routing
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing
<b>TDT</b>	Televisão Digital Terrestre
<b>VoIP</b>	Voice over Internet Protocol
<b>VPLS</b>	Virtual Private LAN Service
<b>VPN</b>	Virtual Private Network
<b>VPRN</b>	Virtual Private Routed Network
<b>VPWS</b>	Virtual Private Wire Service
<b>VXLAN</b>	Virtual Extensible LAN
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing

# 1 Introdução

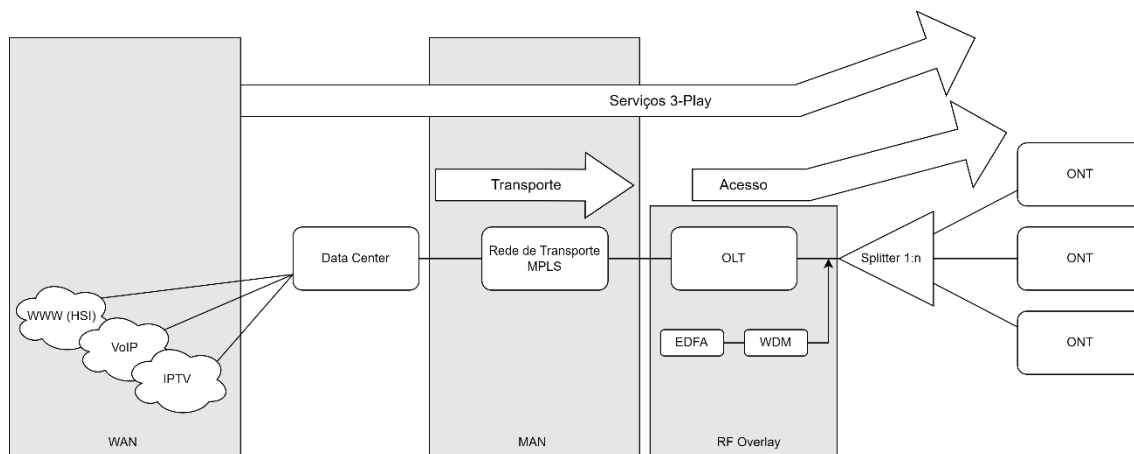
No primeiro capítulo deste relatório é apresentado o contexto em que o projeto se insere, bem como os principais objetivos inicialmente propostos e a motivação para a sua realização. É também proposta a calendarização do mesmo representada em diagrama de *Gantt*, e por fim descreve-se a forma como o documento se encontra organizado nos demais capítulos.

## 1.1 Contextualização

As redes de telecomunicação estão em constante desenvolvimento e expansão, de forma a ir ao encontro das necessidades dos seus utilizadores, e da contínua evolução das aplicações e serviços que requerem não só cada vez débitos mais elevados, mas também um conjunto de tecnologias capazes de acomodar de forma integrada e convergente a prestação de serviços digitais.

Na redes de acesso, a disponibilização de serviços *triple play* e de conteúdos digitais, os operadores recorrem a redes *Passive Optical Network* (PON) pois estas são a melhor opção tecnológica para fazer face às referidas exigências, necessitando no entanto do suporte de uma rede de transporte onde o *Multiprotocol Label Switching* (MPLS), aliado a um protocolo de sinalização, é o *standard* atualmente no que toca a esse tipo de necessidade.

Este projeto visa apresentar um laboratório *full-stack* no que à rede de um operador de telecomunicações diz respeito, capaz de combinar diferentes mecanismos e tecnologias desde a implementação dos serviços necessários, à passagem pela rede de transporte e respetiva entrega na rede de acesso, como ilustrado na Figura 1.



**Figura 1** Diagrama geral

## 1.2 Motivação e objetivos

A motivação principal para a realização deste projeto surge de uma intenção pessoal em realizar um projeto de desenvolvimento na área das infraestruturas de rede, aliando a atividade profissional à componente académica. Por outro lado, importa salientar que a implementação deste projeto vai de encontro à estratégia da Universidade da Maia, nomeadamente do Centro Avançado de Telecomunicações (CAT), que pretende disponibilizar aos alunos do ramo de Redes e Cibersegurança (Licenciatura de Informática) e do ramo de Telecomunicações (Mestrado Tecnologias de Informação Comunicação e Multimédia) um laboratório de experimentação de redes de transporte e acesso, ao nível dos operadores de telecomunicações.

Nesse sentido surge o objetivo implementar uma solução pouco explorada até então pelos estabelecimentos de ensino da área, em possibilitar o estudo prático de tecnologias de rede de acesso utilizando a fibra ótica como meio físico de transmissão, nomeadamente a tecnologia de rede *Gigabit Passive Optical Network* (GPON), sendo que para tal foram definidos os seguintes objetivos:

- Análise do Estado da Arte relativo a tecnologias de redes de acesso baseadas em fibra ótica como meio físico de transmissão;
- Estudo detalhado da tecnologia GPON;
- Estudo e implementação de diversos cenários de PON – *Fiber to The x* (FTTx) em laboratório;

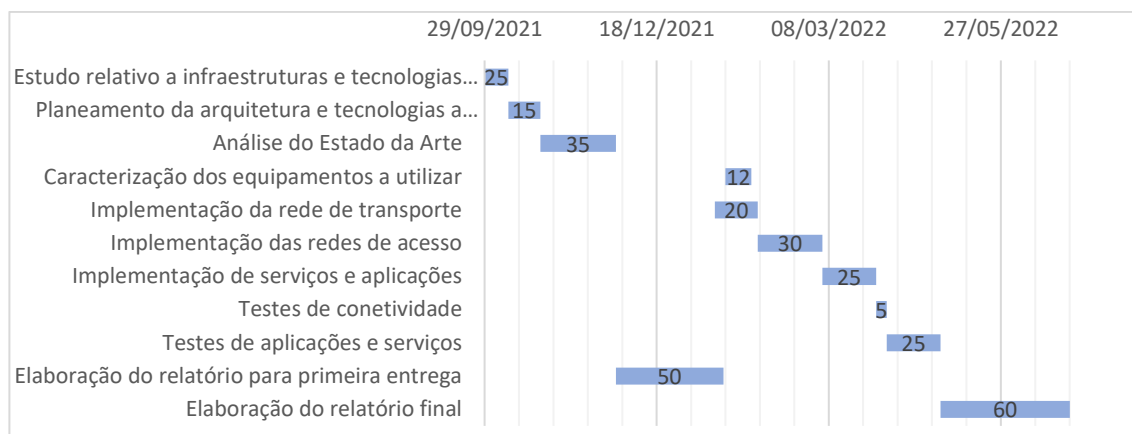
- Estudo e implementação de diversos cenários de rede de transporte nomeadamente a implementação das tecnologias MPLS e *Segment Routing* (SR), e respetivos serviços de acesso, tais como *Virtual Private LAN Service* (VPLS), *Virtual Private Routed Network* (VPRN) e *Ethernet Virtual Private Network* (EVPN);
- Produção de documentação para estudo da solução implementada.

### 1.3 Calendarização

O projeto vai ser desenvolvido durante dois semestres, segundo o planeamento apresentado na Tabela 1 e no diagrama de *Gantt*.

**Tabela 1** Calendarização do projeto

ID	Atividades	Duração	Início	Término
1.	Tarefas de pesquisa	87	15/09/2022	11/12/2022
1.1.	Estudo relativo a infraestruturas e tecnologias de redes de acesso em fibra ótica	25	15/09/2022	10/10/2022
1.2	Planeamento da arquitetura e tecnologias a implementar	15	10/10/2022	25/10/2022
1.3	Análise do Estado da Arte	35	25/10/2022	29/11/2022
1.4	Caracterização dos equipamentos a instalar	12	19/01/2022	31/01/2023
2.	Tarefas de implementação	105	14/01/2023	29/04/2023
2.1	Implementação da rede de transporte	20	14/01/2023	03/02/2023
2.2	Implementação da rede de acesso	30	03/02/2022	05/03/2022
2.3	Implementação dos serviços e aplicações	25	05/03/2023	30/03/2023
2.4	Testes de conectividade	5	30/03/2023	04/04/2023
3.	Elaboração do relatório			
3.1	Elaboração de relatório para a primeira entrega	50	22/11/2022	18/01/2023
3.2	Elaboração do relatório final	60	29/04/2023	28/06/2023



**Figura 2** Diagrama de *Gantt*

## 1.4 Metodologias e recursos

Este projeto será implementado nas instalações da Universidade da Maia (UMAIA), mais precisamente no Laboratório de Telecomunicações de forma a poder dotar o esse espaço de condições para explorar a partir daí o ensino prático das tecnologias em causa. O desenvolvimento do projeto irá utilizar os recursos materiais já existentes no citado laboratório, sendo que o mesmo se encontra dotado de todos os equipamentos necessários.

O projeto será desenvolvido numa primeira fase segundo um método de pesquisa qualitativo, onde o intuito principal foi o de investigar as tecnologias disponíveis e em utilização pelos principais operadores Nacionais e Internacionais, seguindo-se posteriormente uma componente prática de implementação do mesmo, baseado nas informações recolhidas.

Tratando-se de um projeto onde o objetivo passa por desenvolver conteúdos de ensino adaptados à componente prática relativos a diversas tecnologias, será importante não se cingir precisamente à escolha de uma arquitetura ou método de implementação, mas sim proceder à implementação de uma solução dinâmica e que permita uma experimentação abrangente de múltiplas soluções.

## **1.5 Organização do relatório**

O relatório é composto por três capítulos que descrevem o desenvolvimento do projeto e o trabalho realizado.

O capítulo um apresenta o enquadramento do projeto e as motivações que levaram à sua realização, bem como os principais objetivos a cumprir e a calendarização do mesmo segundo as diferentes tarefas e atividades.

O segundo capítulo apresenta conceitos teóricos sobre algumas tecnologias e protocolos, bem como modelos de implementação estudados no âmbito do projeto.

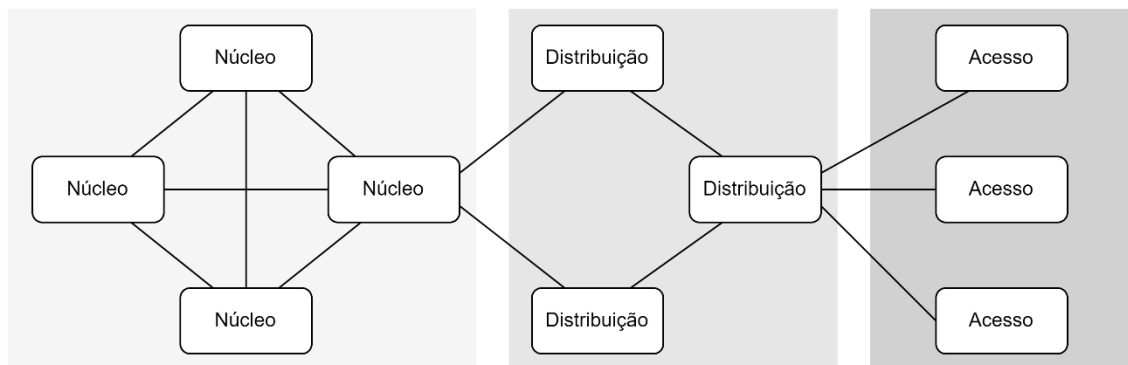
No terceiro e último capítulo são apresentadas as conclusões relativamente ao estudo efetuado.

## 2 Tecnologias e redes de telecomunicações

### 2.1 Redes de telecomunicações

#### 2.1.1 Hierarquia

Um operador de telecomunicações geralmente segmenta a sua rede segundo o modelo hierárquico com três camadas (núcleo, distribuição e acesso), como apresentado na Figura 3, sendo que este modelo facilita a implementação, operação e gestão da mesma. A camada de núcleo deve ser capaz de transportar grandes agregados de tráfego, bem como suportar a conectividade das camadas inferiores, seguindo tipicamente uma topologia em malha. A camada de distribuição é por sua vez, responsável pela interligação entre o núcleo e o acesso e é normalmente implementada numa topologia em anel. Como ponto de demarcação, entre o operador e os assinantes, encontra-se a rede de acesso, que fornece conectividade diretamente a uma grande variedade de utilizadores, sendo que as tecnologias e protocolos implementados dependem das necessidades e dos serviços proporcionados aos utilizadores.



**Figura 3** Arquitetura segundo o modelo hierárquico

### **2.1.2 Fibra ótica**

A fibra ótica é neste momento o meio físico de transmissão mais avançado tecnologicamente, sendo capaz de suportar os requisitos funcionais dos próximos tempos. As principais vantagens da sua utilização são imensas relativamente a outros meios de transmissão, como por exemplo o cobre, destacando-se o débito elevado, a capacidade de cobrir longas distâncias sem a utilização de qualquer equipamento ativo, a imunidade às interferências eletromagnéticas, e a reduzida possibilidade da ocorrência de fenómenos associados à degradação de sinal, entre outras. Para além das vantagens técnicas assinaladas, a utilização da fibra ótica sofreu também um decréscimo financeiro significativo, nomeadamente ao nível dos custos de instalação, de componentes, de equipamentos e de mão-de-obra. [1]

## **2.2 Tecnologias de transporte**

A rede de transporte consiste, geralmente, numa rede de fibra ótica que tem como objetivo principal ser o nível de encaminhamento entre o operador e o cliente, ou por exemplo entre diversos *sites* de uma determinada instituição, proporcionando uma ligação segura e resiliente às redes de acesso para transporte da informação.

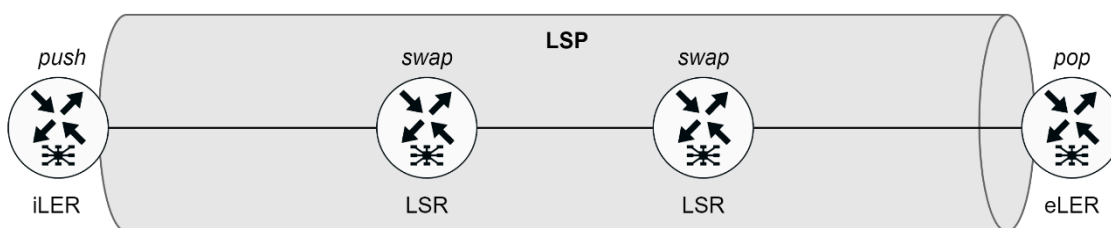
O *Multiprotocol Label Switching* e o *Wavelength Division Multiplexing* (WDM), são duas tecnologias de transporte que apesar de servirem diferentes propósitos, inclusivamente operando em diferentes camadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), são ambas capazes de aumentar a capacidade e a eficiência de uma determinada rede de telecomunicações.

### **2.2.1 Multiprotocol Label Switching (MPLS)**

O MPLS é um mecanismo de transporte cuja principal função é proceder ao encaminhamento de dados de uma forma mais eficiente do que as tradicionais redes IP baseadas em protocolos de encaminhamento, desde logo por se abstrair de uma série de informação contida no cabeçalho dos pacotes IP, que é mais do que a necessária para tomar a “simples” decisão de qual o próximo ponto de entrega de determinado pacote, também designado de *next-hop*. Esta tecnologia dispõe também de métodos avançados

de engenharia de tráfego, o que significa que é capaz de manipular o tráfego dependendo das necessidades da rede em causa. Resumidamente o MPLS é uma tecnologia de comutação de etiquetas (*Label Switching*) que define um caminho específico para uma sequência de pacotes. Cada pacote é identificado por uma etiqueta específica que lhe é atribuída, e o encaminhamento ocorre com base nessa mesma etiqueta [2], [3].

Num domínio MPLS, os nós da rede são identificados como *Label Edge Router* (LER) ou *Label Switching Router* (LSR), sendo que os LER são os equipamentos que se encontram no extremo do caminho ou *Label Switched Path* (LSP), e são distinguidos como sendo o *ingress LER* ou o *egress LER* dependendo se se encontram no início ou no final do túnel MPLS respetivamente. A distinção dos nós numa infraestrutura MPLS, deriva das funções realizadas por cada tipo de equipamento, sendo que de uma forma geral, os routers LER têm como principais funções: a atribuição da etiqueta ao pacote (operação *push*), a classificação dos pacotes, a sua atribuição a uma *Forwarding Equivalence Class* (FEC), para além da remoção da etiqueta (operação *pop*) no ponto de demarcação com a rede do cliente. Por sua vez, os LSRs são responsáveis por encaminhar os pacotes baseando-se apenas na etiqueta. Assim sendo, ao receber um pacote o LSR troca a etiqueta existente (operação *swap*) e encaminha-o para o próximo LSR, sendo que esta operação se repete até que o pacote seja entregue ao eLER. Os LSRs são também responsáveis por manter as tabelas de encaminhamento. A Figura 4 exemplifica um domínio MPLS e os equipamentos intervenientes [2].



**Figura 4** Domínio MPLS

### 2.2.1.1 *Label Distribution Protocol*

O LDP é um protocolo de sinalização utilizado pelos nós de um domínio MPLS de forma a possibilitar a criação e troca de etiquetas entre si. Mantém uma tabela de encaminhamento atualizada, sendo que para tal é necessário estabelecer previamente uma adjacência com os nós vizinhos, recorrendo-se a um protocolo de *routing*, como por

exemplo OSPF ou BGP. Relativamente aos LSPs, importa salientar que o LDP, limita-se à decisão tomada pelos protocolos de *routing* para encaminhar o tráfego, por comutação de etiquetas [2].

#### 2.2.1.2 *Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering*

O protocolo RSVP é uma abordagem alternativa ao LDP, sendo que a extensão de *Traffic Engineering* (TE) acrescenta determinados benefícios ao transporte do tráfego através de uma rede MPLS, embora não se considere um protocolo de encaminhamento, existe a possibilidade de definir caminhos (LSP) administrativamente, não ficando dependente do caminho definido pelo *Internal Gateway Protocol* (IGP), bem como de configurar mecanismos de proteção como a possibilidade de associar caminhos secundários (*path loose*) ou a vertente de *fast reroute*, o que melhora o tempo de convergência provocado por falhas. Outro aspeto relevante desta tecnologia é o facto de permitir mapear o tráfego de serviços críticos em LSPs previamente configurados, isto significa que o operador pode definir a largura de banda atribuída ao cliente baseado em determinados parâmetros. Isto difere, contudo, de possíveis políticas de *Quality of Service* (QoS) a implementar, no sentido de que estas últimas podem ser aplicadas em todo e qualquer ponto de congestionamento da rede, ao contrário das aplicadas na reserva de largura de banda do RSVP-TE que não considera o possível congestionamento ao nível do plano de encaminhamento [4], [5].

#### 2.2.1.3 *Segment Routing*

*Segment Routing* (SR) é uma tecnologia de encaminhamento que simplifica a gestão e engenharia de tráfego na rede de transporte, esta tecnologia funciona dividindo a totalidade dos caminhos numa rede em pequenos segmentos, e atribuindo diferentes identificadores pelos diferentes segmentos que se criou, bem como pelos nós da rede. Ao ordenar os nós pelos seus identificadores, é possível obter uma solução de encaminhamento extremo-a-extremo, sendo que para este processo ocorrer será necessária a configuração de um protocolo IGP na rede de transporte [6].

Em cada nó e prefixo de rede é configurado um *Segment ID* que é anunciado aos seus vizinhos pelo IGP que logo calcula a rota a seguir, sendo que o iLER gere todas estas informações, enquanto os nós principais encapsulam as informações da rota de acordo com o mecanismo de encaminhamento e a executam a comutação *hop-by-hop*. Este

método reduz substancialmente o número de mensagens trocadas entre os equipamentos, consequentemente reduz também os recursos de *hardware* consumidos pelos nós de comutação e a largura de banda necessária para a troca destas mensagens de controlo quando comparado com a implementação típica de uma rede MPLS. Pelo contrário, recorrendo ao *Segment Routing*, por forma a controlar o LSP, apenas será necessário realizar operações no nó de entrada (iLER), logo as ações no plano de controlo são mínimas [6].

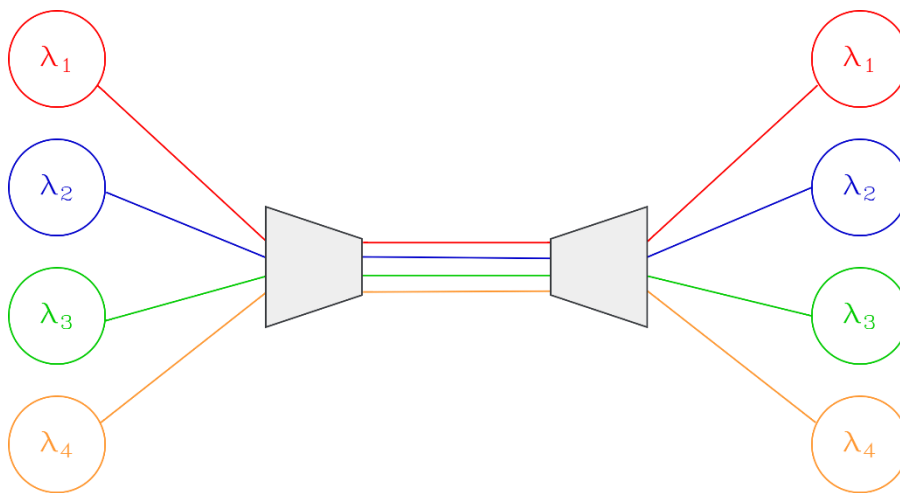
O mecanismo SR é diferente dos protocolos RSVP-TE e LDP, nomeadamente no seguinte:

- O RSVP-TE e o LDP são protocolos de sinalização utilizados em redes MPLS, necessários para configurar e manter LSPs, enquanto o SR visa a identificação de um segmento ou caminho específico na rede e não requer a existência de uma infraestrutura MPLS.
- O RSVP-TE e o LDP dependem do plano de controlo para a configuração e manutenção dos LSPs, enquanto o SR recorre ao modelo de *routing* baseado na origem, sendo que o plano de encaminhamento utiliza a informação dos SIDs para determinar o caminho.
- O RSVP-TE e o LDP são usados para construir LSPs, a que posteriormente se poderão aplicar mecanismos de engenharia de tráfego, nomeadamente ao nível da proteção, da otimização de largura de banda e do estabelecimento de *Service Level Agreements* (SLAs) fim a fim. O SR, por outro lado, permite um controlo mais preciso sobre o encaminhamento de pacotes, e pode ser usado para implementar técnicas de engenharia de tráfego, a comutação de segmentos e o mapeamento de serviços sem a necessidade de uma infraestrutura MPLS separada.

### **2.2.2 Wavelength Division Multiplexing (WDM)**

WDM é um método de multiplexagem ótica, que consiste em combinar um determinado número de comprimentos de onda na mesma fibra, utilizado principalmente em redes com elevadas taxas de transmissão e de longa distância. De uma forma conceptual isto assemelha-se à multiplexagem por divisão de frequências utilizada por

exemplo nas ligações de rádio por micro-ondas ou nos sistemas de satélite, sendo que no caso do WDM os diferentes comprimentos de onda a utilizar devem ser divididos de forma adequada, de modo a não causar interferências. Convém, contudo, salientar, que os avanços na tecnologia, permitem a utilização de comprimentos de onda cada vez menos afastados entre si, o que melhora significativamente a relação entre a largura de banda disponível e a utilização efetiva de uma única fibra. Na emissão é efetuada a combinação dos sinais, enquanto no extremo oposto é realizada a separação ou desmultiplexagem, de forma a ser possível entregar a cada recetor o sinal que lhe é devido, tal como ilustrado na Figura 5. Esta solução é atrativa no sentido de que uma única fibra pode ser utilizada para efetuar múltiplas ligações distintas o que se resume num decréscimo significativo de custos, nomeadamente os associados à instalação de cablagem. [7]



**Figura 5** Esquema de sistema de transmissão WDM [8]

## 2.3 Serviços de transporte

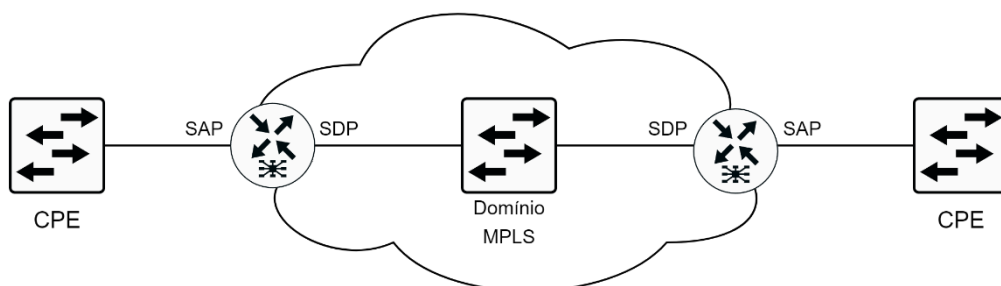
Esta seção apresenta diversas tecnologias capazes de providenciar conectividade e serviços de *Layer 2* e *Layer 3* através da infraestrutura de um operador de telecomunicações e pode ser utilizado pelos seus clientes para interligar edifícios que não estejam diretamente interligados, encapsulando e transportando os dados através do domínio MPLS, sendo que um operador pode oferecer diferentes tipo de serviços a múltiplos clientes. Cada um dos serviços, ou *Virtual Private Network* (VPN), são redes

lógicas privadas distintas entre si, identificadas pelo seu respectivo identificador de serviço.

Para além dos tradicionais serviços utilizados na rede de transporte sobre o mecanismo MPLS como a VPLS e VPWS para *Layer 2*, e a VPRN para *Layer 3*, esta seção visa para apresentar uma abordagem sobre os serviços EVPN que é também ela uma ferramenta importante no que toca ao transporte de *frames Ethernet* e pacotes IP.

### 2.3.1 Virtual Private LAN Service (VPLS)

Uma *Virtual Private LAN Service (VPLS)* é um serviço multiponto de *Layer 2* que pode ser utilizado para interligar mais de dois sites de um determinado cliente. Do ponto de vista do cliente, esta tecnologia apresenta-se como se se tratasse de um tradicional comutador Ethernet entre as suas localizações como apresentado na Figura 6. As *frames ethernet* são encapsuladas em etiquetas MPLS e encaminhadas através da rede do operador [9].



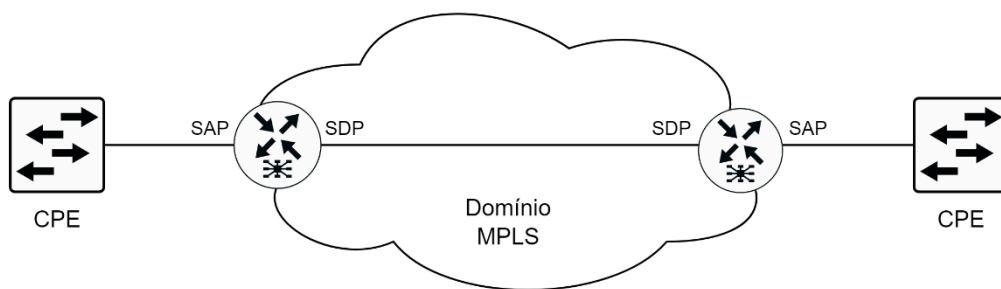
**Figura 6** Serviço VPLS entre dois sites

A VPLS emula um serviço *Ethernet* comutado, logo existe a necessidade de manter uma tabela de encaminhamento de endereços MAC, ou *Forwarding Database (FDB)*, para cada VPLS. Quando um *frame unicast* com um endereço de origem desconhecido chega a um *Service Access Point (SAP)* ou *Service Distribution Point (SDP)*, a VPLS aprende esse mesmo endereço, de uma forma semelhante à que um comutador *Ethernet* aprende um MAC nas suas portas, sendo que a FDB associa endereços MAC a SAPs e SDPs. Quando um *frame Ethernet* chega a um SAP ou SDP, é realizada uma pesquisa na FDB pelo endereço de destino. No caso de já existir uma entrada para o endereço, o *frame*

é encaminhado para o respectivo SAP ou SDP. Caso este seja desconhecido, o *frame* é enviado para todos os SAP e SDP, método semelhante ao de um *switch Ethernet* [9].

### 2.3.2 Virtual Private Wire Service (VPWS)

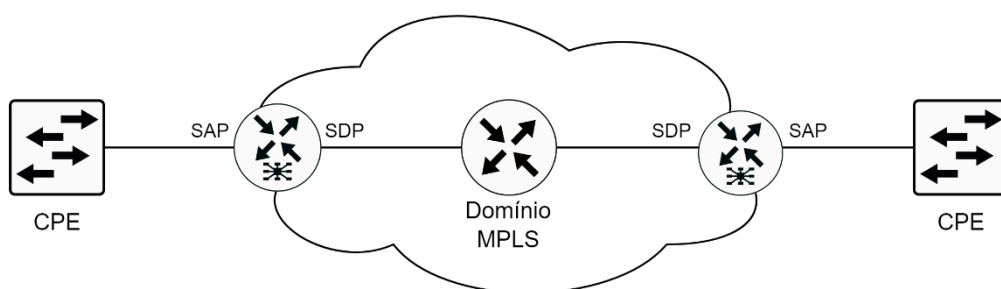
Uma *Virtual Private Wire Service* (VPWS) é um serviço *Layer 2* ponto a ponto que simula a interligação direta entre dois *sites* remotos como se estivessem interligados por um simples cabo, como ilustra a Figura 7, sendo que o cliente não tem qualquer informação ou conhecimento sobre a rede do operador. Uma VPWS pode atuar como uma ligação *ethernet* (ePIPE), uma ligação *frame relay* (fPIPE), uma ligação ATM (aPIPE) ou um circuito TDM (cPIPE). Tal como num serviço do tipo VPLS, as *frames Layer 2* do cliente são encapsuladas em etiquetas MPLS e encaminhadas através do túnel MPLS do operador [10].



**Figura 7** Serviço VPWS entre dois sites

### 2.3.3 Virtual Private Routed Network (VPRN)

*Virtual Private Routed Network* (VPRN) é um serviço *Layer 3* que faz com que a rede do operador de telecomunicações se assemelhe a um *router IP* e que interliga dois ou mais sites de um determinado cliente, como ilustrado na Figura 8. A VPRN fornece a possibilidade aos equipamentos na periferia do cliente, ou *Customer Edge* (CE), de trocarem informações de encaminhamento de rotas com determinada VPRN, tal como se estivessem interligados através de um *router IP* [11].



**Figura 8** Serviço VPRN entre dois sites

Cada nó PE a fornecer serviços VPRN mantém uma tabela de encaminhamento IP separada para cada serviço, sendo que cada cliente do operador tem o seu próprio espaço de endereçamento privado. O serviço VPRN utiliza encaminhamento VPN e *Virtual Routing and Forwarding* (VRF) no nó PE de forma a manter a informação de encaminhamento para cada cliente. Uma VRF é uma tabela lógica de encaminhamento privado que isola a informação de encaminhamento de um cliente, do cliente seguinte, e também dos nós MPLS da rede do operador. Cada PE mantém separadamente várias tabelas baseado no número de diferentes serviços VPRN que cada nó suporta.

O transporte de dados do cliente é semelhante a uma VPLS ou VPWS, exceto no que toca aos cabeçalhos de *Layer 2* sendo que estes são removidos e os pacotes IP são encapsulados no cabeçalho MPLS. Os *frames* do cliente chegam ao SAP e são encapsulados com um rótulo de serviço interno e um rótulo de transporte externo, sendo transportados ao longo do domínio MPLS [10].

### 2.3.4 Ethernet Virtual Private Network (EVPN)

O EVPN é uma tecnologia que introduz um modelo unificado, quer para a prestação de serviços VPN, quer para a prestação de serviços baseados em *cloud*.

Os serviços de transporte tradicionais, tais como o VPLS e o VPRN, usam diferentes protocolos de sinalização, sendo que essa multiplicidade de tecnologias, tal como o BGP ou o LDP no estabelecimento dos tuneis de serviço de *layer 2* ou o MP-BGP para o estabelecimento dos serviços de *layer 3*, aumentam a complexidade e o custo operacional das redes de transporte, uma vez que o plano de controlo tem que acomodar todas estas opções.[12]

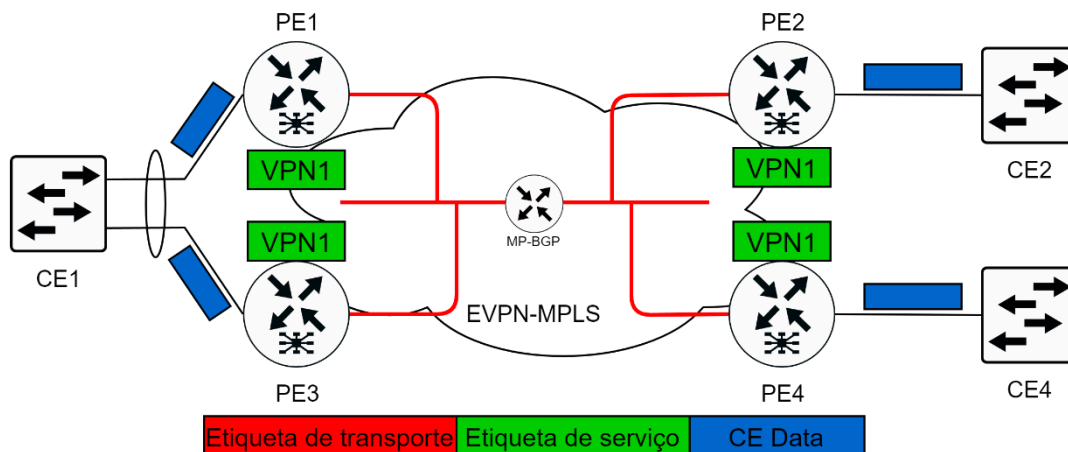
O paradigma sobre o qual assenta tecnologicamente o EVPN, sistematiza o plano de controlo, recorrendo ao MP-BGP, independentemente do tipo de serviço de conectividade a prestar. Assim sendo, a versatilidade deste protocolo de *routing*, permite que os equipamentos de demarcação da rede de operador (PEs) troquem rotas EVPN, de acordo com a tipologia de serviços, encontrando-se definidos os seguintes tipos de rotas, nomeadamente os ilustrados na Tabela 2.

**Tabela 2** – Tipos de Rotas EVPN

<b>Tipo de Rota</b>	<b>Descrição</b>	<b>Objetivo</b>
1	<i>Ethernet Auto-Discovery</i> (A-D)	Utilizado em topologias <i>multi-home</i> para suportar convergência rápida.
2	Anúncio MAC/IP	Utilizado para anunciar o endereço MAC ou MAC/IP do <i>host</i> .
3	<i>Incluse Multicast Ethernet Tag</i> (IMET)	Utilizado para transportar o tráfego <i>Broadcast</i> , <i>unicast</i> desconhecido, e <i>multicast</i> (BUM) para outros dispositivos PE.
4	Segmento <i>Ethernet</i> (ES)	Utilizado em topologias <i>multi-homed</i> para suportar a descoberta de segmentos <i>Ethernet</i> e eleição do <i>Designated Forward</i> (DF)
5	Prefixo IP	Utilizado para anunciar prefixos IP para conectividade <i>inter-subnet</i> em serviços VPN de <i>Layer 3</i> .

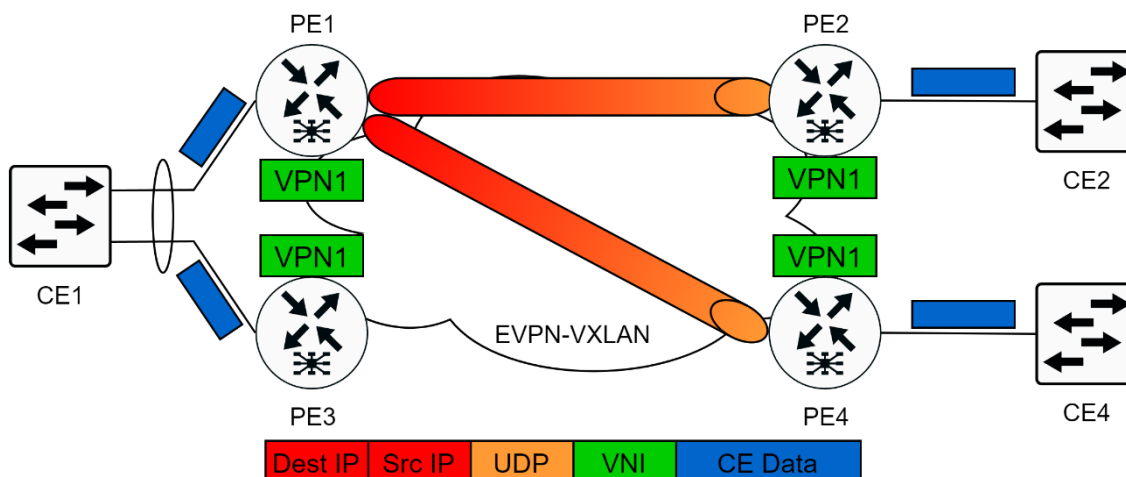
Relativamente ao plano de encaminhamento, esta tecnologia prevê o encapsulamento do tráfego dos clientes em tuneis de serviço, utilizando etiquetas para a identificação unívoca dos serviços. A este nível e tendo também como objetivo a adaptabilidade do EVPN aos serviços baseados em *cloud*, existem duas opções relativamente ao encapsulamento, nomeadamente EVPN com encapsulamento MPLS ou EVPN com encapsulamento *Virtual Extensible LAN* (VXLAN).[12]

Na opção EVPN-MPLS (Figura 9) adaptada aos serviços de conectividade de clientes, recorre a etiquetas para identificar e multiplexar os serviços.



**Figura 9** EVNP-MPLS

Na opção EVPN-VXLAN (Figura 10), utilizada para serviços de conectividade entre datacenters, recorre-se ao *VXLAN network identifier* (VNI) como mecanismo de multiplexação de serviços.



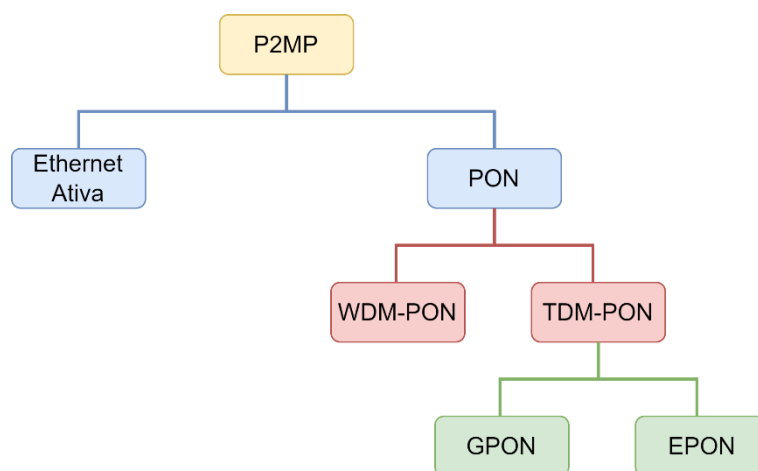
**Figura 10** EVPN-VXLAN

No caso representado na Figura 10 os dados representados são necessários para transportar a informação entre os nós, sendo:

- Um cabeçalho IP adicional para encaminhamento de pacotes ao longo da rede;
- Uma porta UDP de destino identifica o pacote como VXLAN;
- Um identificador VXLAN (VNI) identifica o serviço VPN associado aos dados do cliente.

## 2.4 Tecnologias de Acesso

As tecnologias de rede de acesso baseadas em fibra ótica são cada vez mais um *standard* sendo que a sua utilização parece até agora ser a que oferece mais garantias no que toca aos débitos de transmissão elevados, cada vez mais necessário, nomeadamente no que toca às redes de acesso, podendo estas ser já exclusivamente em fibra ótica, por exemplo recorrendo a tecnologias como *Ethernet* ativa, ou PON [13], estas possuem diversas vantagens nomeadamente quando comparadas com tecnologias como o *Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)*, este (e outros) tipo de tecnologia baseada em cabos de cobre tem uma capacidade limitada em particular no que toca ao fornecimento de elevada largura de banda em locais distantes da central do operador devido às perdas no cobre, contrariamente ao que acontece com os cabos de fibra ótica em que as atenuações são relativamente baixas e pouco dependentes do comprimento dos cabos [14]. A Figura 11 representa as diferentes arquiteturas e tecnologias de acesso para rede de topologia ponto multiponto, e as suas variantes.

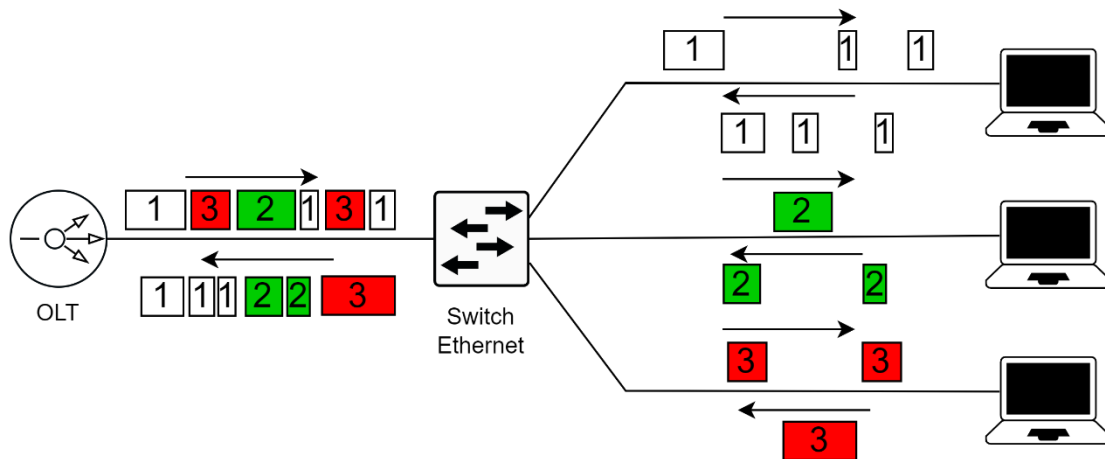


**Figura 11** Arquiteturas e tecnologias de redes FTTH ponto-multiponto [13]

### 2.4.1 Ethernet Ativa

Numa arquitetura do tipo *ethernet* ativa, o ponto de distribuição é um equipamento ativo, normalmente um comutador *ethernet* (ver Figura 12), funcionando como uma rede *ethernet* comum, sendo este o responsável por agregar o tráfego proveniente dos diversos clientes, no caso os ONT. Este tipo de arquitetura requer algum investimento na

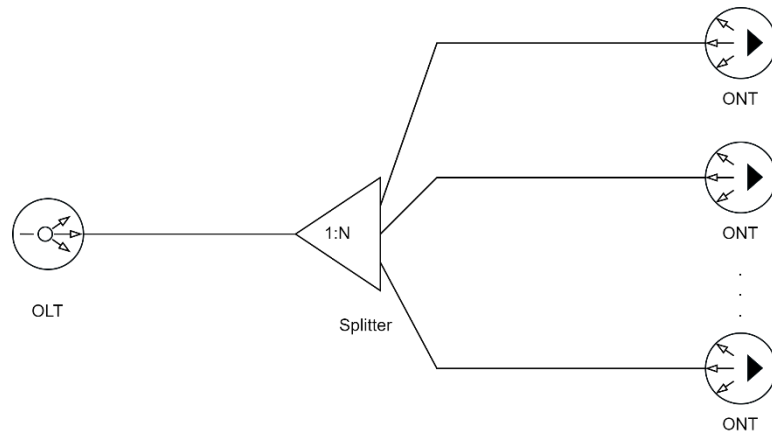
construção da rede uma vez que é necessário dotar os locais de instalação dos equipamentos (por exemplo armários de rua) de energia elétrica, bem como de condições para acomodar este tipo de equipamento [13]. Esta característica em particular é uma desvantagem relativamente às redes óticas passivas, onde não existe a necessidade de alimentar eletricamente os pontos de distribuição.



**Figura 12** Arquitetura ponto-multiponto *ethernet* ativa [13]

## 2.4.2 PON

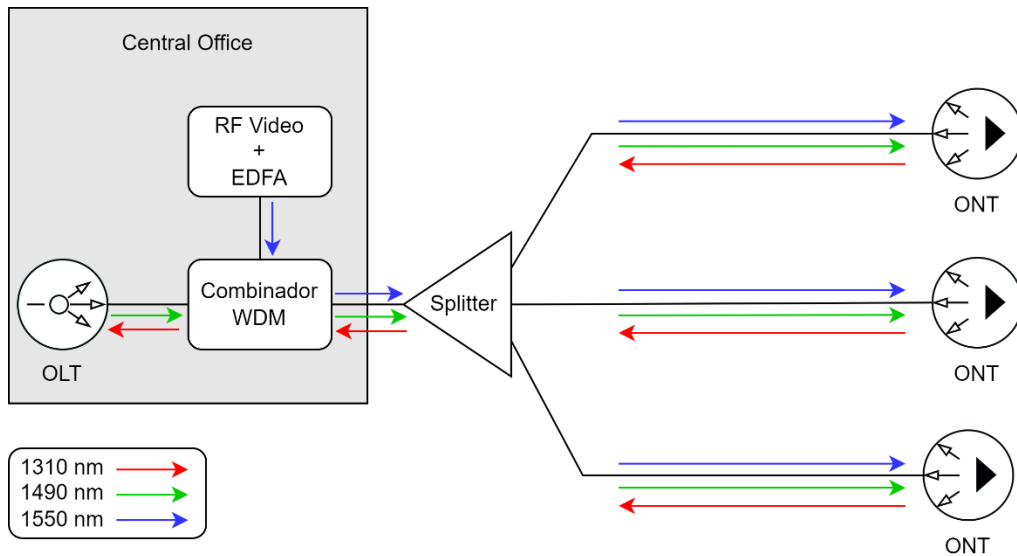
Uma rede ótica passiva (PON) é uma rede ponto-multiponto composta por dois equipamentos principais, o *Optical Line Terminator* (OLT) e o *Optical Network Terminator* (ONT), sendo que o funcionamento básico é a transmissão de dados entre um OLT e os diversos ONT. Outro equipamento fundamental do circuito de comunicação, nomeadamente em redes ponto multiponto, é o repartidor ótico (*splitter*), sendo que este elemento passivo é responsável por dividir a potência ótica emitida pelo equipamento central, permitindo a comunicação com os respetivos equipamentos terminais ou ONTs [15]. O dimensionamento dos *splitters* é um processo fundamental ao projetar este tipo de redes uma vez que “quanto maior for o número de saídas, maior será a taxa de divisão de potência e, portanto, maior será a atenuação introduzida.” [16] A Figura 13 ilustra a interligação entre os equipamentos acima nomeados.



**Figura 13** Rede PON ponto-multiponto com fator de *splitting* de 1:N

#### 2.4.2.1.1 RF-Overlay

Numa arquitetura PON, seja ela baseada em GPON ou em EPON, o transporte do tráfego em *downstream* é efetuado recorrendo ao comprimento de onda situado entre os 1480 e os 1500 nm, enquanto a transmissão em *upstream* faz uso do comprimento de onda de 1310 nm. A gama de comprimentos de onda, situada entre os 1550 e o 1560 nm está reservada para o serviço de difusão de sinal de vídeo, ou RF Overlay, o que possibilita o fornecimento destes serviços em separado. Isto é, numa dada rede ótica passiva, um cliente em particular pode requisitar a entrega de um serviço de televisão, sem necessitar de subscrever qualquer serviço baseado em IP, nomeadamente de voz, dados ou vídeo. Para isso é utilizado um combinador de comprimento de onda, como demonstra a Figura 14, em que numa única fibra são enviados os diversos comprimentos de onda, cabendo ao equipamento terminal o processo de sincronização para a correta receção da informação em *downstream* [17].



**Figura 14** RF Overlay em uma arquitetura PON [17], [18].

O fornecimento deste serviço prevê a utilização de diversos equipamentos, inicialmente a captação do sinal analógico realizado através de uma antena e um decodificador e modelador UHF, sendo este conjunto denominado por *headend*. Este sinal modulado é encaminhado para um transmissor ótico com a finalidade de converter o sinal analógico de forma a ser possível enviá-lo por fibra ótica para um amplificador ótico, sendo que usualmente os amplificadores utilizados nesta aplicação são amplificadores dopados de érbio (elemento químico de símbolo Er) denominados *Erbium-Doped Fiber Amplifier* (EDFA) e/ou de itérbio (elemento químico de símbolo Yb) denominados de *Erbium Yterbium Doped Fiber Amplifier* (EYDFA).

#### 2.4.2.2 TDM-PON

TDM-PON é neste momento a técnica de multiplexagem mais utilizada na rede de acesso sendo que o tráfego é multiplexado no domínio do tempo, possibilitando o fluxo de tráfego utilizando apenas um canal de comunicação, no caso concreto, uma única fibra partilhada. São utilizados os já mencionados *splitters* que no sentido *downstream* dividem o sinal proveniente do OLT, e no sentido contrário combinam cada um dos sinais óticos emitidos pelos ONT, no mesmo comprimento de onda. Cada ONT acede à informação que lhe é destinada através da inclusão de um campo de identificação no cabeçalho do pacote, ou pela localização do *time slot*. [19][13].

Esta solução é viável enquanto a necessidade de largura de banda, ou o agregado de utilizadores que partilham a PON não se torna excessiva, sendo que quando “N” utilizadores partilham a mesma PON, a taxa de transmissão deve ser “N” vezes a taxa de dados dedicada a cada cliente [19].

#### **2.4.2.2.1 EPON**

EPON, ou *Ethernet Passivel Optical Network* é uma tecnologia PON, que transporta o tráfego em tramas *ethernet*. O EPON fornece uma taxa de transmissão bidirecional de 1,25Gbit/s (1Gbit/s depois da codificação de linha 8b/10b) e utiliza os comprimentos de onda de 1490 nm e 1310 nm para o tráfego de *downstream* e *upstream* respetivamente, reservando o comprimento de onda de 1550 nm para extensões futuras ou outros serviços, como por exemplo a transmissão de vídeo descrita na secção 2.4.2.1.1. Embora na norma 802.3ah (segundo a qual o EPON foi normalizado pelo IEEE) o *budget* ótico tenha sido especificado em 24 dB com o fator de *splitting* máximo de 1:16, na prática a tecnologia de transmissão evoluiu de tal forma que ficaram disponíveis módulos óticos capazes de emitir uma potência ótica de 29 dB, o que resultou que a maior parte das redes EPON fossem na realidade dimensionadas com fatores de *splitting* de 1:32 ou mesmo de 1:64 [20], [21].

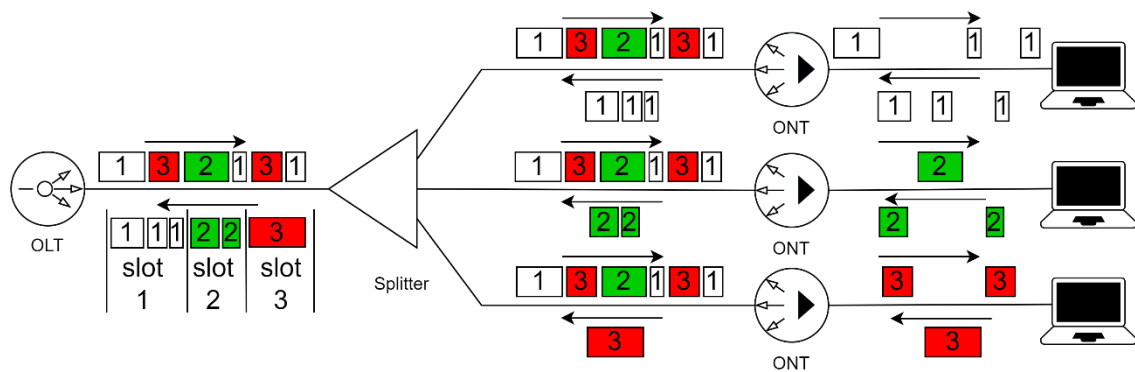
A conectividade ponto-multiponto é suportada devido ao protocolo *Multipoint Control Protocol* (MPCP) que utiliza tramas *ethernet* geradas pela subcamada de controlo (MAC), sendo que este é o método utilizado para evitar colisões. Um ONT localizado no cliente é reconhecido e registado pelo OLT utilizando um *handshake* MPCP, ocorrendo esse processo da seguinte forma, nomeadamente:

- O OLT envia uma mensagem de reconhecimento (GATE) para todos os ONT não registados;
- Um ONT não registado responde enviando uma mensagem de pedido de registo (REGISTER\_REQ);
- Quando recebida a mensagem e aprovado o pedido, o OLT regista o ONT enviando uma mensagem de registo (REGISTER);

- Finalmente o ONT envia a confirmação (*acknowledge*) enviando uma mensagem REGISTER\_ACK de volta.

A mensagem do tipo GATE é utilizada também como forma de controlo do lado do OLT, sendo que do lado do ONT a mensagem REGISTER tem como objetivo controlar o estado do pedido de transmissão, o OLT calcula a janela de transmissão através do protocolo *Dynamic Bandwith Allocation* (DBA) [21].

A Figura 15 representa a transmissão de tramas em *upstream* e *downstream* numa arquitetura EPON.



**Figura 15** Transmissão EPON *upstream* e *downstream*

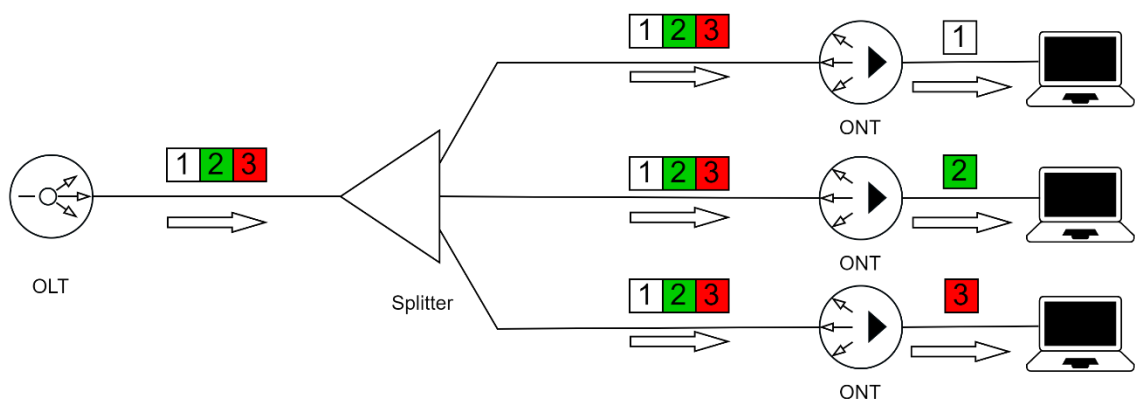
#### 2.4.2.2.2 GPON

De forma a acomodar o rápido crescimento e as necessidades de débito dos utilizadores, bem como acompanhar a exigência dos conteúdos criados e transmitidos através da internet, o *International Telecommunication Unit – Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T) criou a série de padrões ITU-T (G.984.x) sendo esta a base para o *standard* GPON.

Diversas características contribuem para que esta seja a solução técnica mais adotada pelos operadores Europeus e Norte Americanos [13], desde logo porque: permite uma cobertura de até 20 km reduzindo a necessidade de nós na rede, diminui de uma forma substancial os custos de investimento na criação de infraestruturas de rede e de operação na sua manutenção preventiva e corretiva, suporta taxas de transmissão elevadas, sendo que normalmente os operadores fazem uso de 1,2 Gbit/s no sentido *upstream* e 2,4 Gbit/s no sentido *downstream*.

A tecnologia GPON é capaz de suportar os serviços da rede tradicionais, e futuros devido sobretudo ao método de encapsulamento próprio utilizado para transportar o tráfego, designado de GPON *Encapsulation Method* (GEM). Por ação deste mecanismo, ao OLT podem ser associados diferentes fluxos de tráfego, ou seja, pode afirmar-se que o GEM é um identificador de porto virtual que é diferenciador para cada serviço [13], [22], [23].

A Figura 16 representa a transmissão de tramas em *upstream* e em *downstream* numa arquitetura GPON.



**Figura 16** Transmissão GPON *upstream* e *downstream*

#### 2.4.2.2.3 EPON vs GPON

A Tabela 3 apresenta alguns aspetos comparativos entre as duas tecnologias, sendo que uma das características diferenciadoras é desde logo o débito máximo que no GPON permite uma taxa de transferência superior no *downstream*, outro fator de desigualdade é também o método utilizado no transporte do tráfego *ethernet* sendo que graças ao encapsulamento GEM, o GPON torna-se mais versátil nomeadamente na possibilidade de aplicação de de QoS, e na oferta de múltiplos serviços, entre outros [24].

**Tabela 3** EPON vs GPON [25]

	EPON		GPON	
Padrão	IEE 802.3ah		ITU-T G.984	
Débito	Downstream	1,25 Gbit/s	Downstream	2,44 Gbit/s
	Upstream	1,25 Gbit/s	Upstream	1,24 Gbit/s
Comprimento de onda	Downstream	1310 nm	Downstream	1310 nm
	Upstream	1490 nm	Upstream	1490 nm
	RF Overlay	1550 nm	RF Overlay	1550 nm
Protocolo	Ethernet		ATM, Ethernet, TDM	
Alcance (OLT-ONT)	10 ou 20 Km		60 Km	
Eficiência	Downstream	~73%	Downstream	~94%
	Upstream	~61%	Upstream	~93%

## 2.5 Serviços de Acesso

Esta seção pretende descrever o tipo de serviços que uma infraestrutura FTTx/GPON pode oferecer aos seus clientes, sendo que estes serviços podem variar de acordo com o segmento do mercado em que cada cliente se enquadra, nomeadamente:

- Residencial;
- Empresarial;
- Setor público.

### 2.5.1 Residencial

Os serviços de acesso que os *Internet Service Provider* (ISP) fornecem ao utilizador residencial de uma forma comum são aquilo que se designa de serviços *triple-play*, ou seja, IPTV para transmissão televisiva, VoIP para serviços de voz, e Internet de Alta Velocidade (*High Speed Internet – HSI*) para acesso à internet.

O ISP pode ocasionalmente optar também, por prestar outro tipo de serviços como por exemplo alojamento *web*, sistema de *backups* na nuvem, entre outros, sendo que estes serviços podem ser agrupados aos acima referidos.

Este catálogo de serviços, obriga a que a conectividade seja cada vez mais resiliente e eficaz, sendo também a utilização destes serviços por parte do cliente também mais abrangente, seja para trabalho a partir da residência, jogos *online*, *streaming* de vídeo, entre outras.

A utilização que é feita do serviço de internet requer também boa taxa de *upstream*, exemplos disso são aplicações como *backups* alojados em um servidor remoto, ou chamadas de vídeo *online*, sendo que o utilizador atual pode também ter a necessidade de aceder a serviços na nuvem, como imagens de vídeo vigilância em tempo real ou até mesmo aplicações de automação de sistemas instalados na sua residência.

## **2.5.2 Empresarial**

O cliente empresarial tem tipicamente diferentes necessidades e requisitos do cliente residencial, por esse motivo a grande maioria opta sempre que possível por contratar um serviço de acesso em fibra ótica, sendo que à necessidade de elevada largura de banda, acumula a necessidade de resiliência, fiabilidade e segurança, sendo que o serviço empresarial pode até mesmo em alguns casos ser contratado numa infraestrutura de comunicações segregada da responsável pelos clientes residenciais.

Essa infraestrutura não está ao dispor no pequeno ou médio cliente empresarial (PME), no entanto surge uma oportunidade para os operadores de telecomunicações, sendo que este cliente pode na maior parte dos casos ser atendido por uma rede de acesso FTTx tecnicamente semelhante à do cliente residencial, no entanto o cliente empresarial por optar por contratar serviços com recursos extra como por exemplo garantia de alta disponibilidade, cibersegurança e nível de serviço ou *Service-Level Agreement* (SLA).

Os serviços e aplicações alojadas na nuvem são cada vez mais utilizados pelas empresas uma vez que oferecem diversas vantagens, desde logo os custos operacionais. Neste caso, a largura de banda é desde logo um fator importante, no entanto não é o único requisito, a latência é um fator também ele crítico, sendo que as tecnologias FTTH/PON atendem a esse tipo de requisitos.

### **2.5.3 Setor público**

No que diz respeito ao setor público, o planeamento de uma rede FTTx pode também ele ter as suas necessidades específicas, sendo que se edifícios tais como escolas e hospitais exigem cada vez mais das redes de telecomunicações, outras áreas críticas como por exemplo a proteção e segurança pública são também elas auxiliadas pelas novas tecnologias, com aplicações importantes como por exemplo vídeo vigilância, controlo de pontos de entrada ou mesmo vigilância contra incêndios.

Neste caso, o interesse no tipo de serviços oferecidos pelo operador difere em grande parte dos serviços oferecido a clientes residenciais, assemelhando-se um pouco mais ao serviço empresarial, no que toca à necessidade de alta disponibilidade e até mesmo de SLAs ainda mais exigentes. Alguns destes podem também ser prestados por outros operadores, que não o típico fornecedor de serviços de internet (ISP).

### 3 Conclusões

Dada a apresentação de diversas opções dos possíveis métodos para que um operador de telecomunicações proporcione serviços *triple play* e não só, a utilizadores residenciais e empresariais, é possível concluir que o GPON é na atualidade a tecnologia que revolucionou a forma como a Internet de alto débito, o vídeo entregue em formato televisivo, e outros serviços são disponibilizados aos diversos tipos de clientes.

O recurso a uma infraestrutura ótica passiva permite a implementação de uma solução vantajosa no que toca não só à relação custo-benefício, mas também melhor escalabilidade quando comparada com infraestruturas que requerem a utilização de equipamentos ativos intermédios, com por exemplo repetidores ou amplificadores.

Ao nível do transporte, foram abordadas para além das tecnologias que cumprem o *standard* do que é esse nível da rede, como por exemplo o MPLS no que toca ao mecanismo em si, complementado com um protocolo de sinalização como o LDP ou o RSVP-TE, o estudo abordou o que pretende ser uma nova realidade na implementação deste tipo de serviços, como o *Segment Routing* e o EVPN.

## Referências documentais

- [1] J. Buck, *Fundamentals of Optical Fibers*, 2nd ed. 2004.
- [2] Nokia, “Nokia IP Networks and Services Fundamentals Student Guide v4.0,” 2020.
- [3] E. D. Osborne and Ajay. Simha, *Traffic engineering with MPLS*. Cisco, 2002.
- [4] Nokia, “Alcatel-Lucent MPLS Traffic Engineering Fundamentals e,” 2011.
- [5] Nokia, “Alcatel-Lucent Multiprotocol Label Switching - Resource Reservation Protocol (RSVP),” 2011. [Online]. Available: <http://www.alcatel-lucent.com/support>
- [6] Nokia, “Nokia Segment Routing Student Guide v1.0,” 2022.
- [7] G. E. Keiser, “Optical Fiber Technology 5, 339 1999 Article ID ofte,” 1998.
- [8] FiberMall, “Quatro tipos de tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM).” <https://www.fibermall.com/pt/blog/types-of-wavelength-division-multiplexing-wdm.htm> (accessed Nov. 26, 2022).
- [9] Nokia, “Nokia Virtual Private LAN Services Student Guide v4.0.0,” 2021.
- [10] Nokia, “Nokia MPLS Services Overview,” 2015.
- [11] Alcatel-Lucent, “Alcatel-Lucent Virtual Private Routed Networks (VPRN),” 2011.
- [12] Nokia, “Nokia EVPN Services Student Guide v1.0,” 2022.
- [13] “ANACOM - Redes FTTH/B/P.” <https://www.anacom.pt/render.jsp?categoryId=340463> (accessed Nov. 26, 2022).
- [14] Pereira Eduard and Abbade André, “Comparativo Rede PON x Rede Mista,” 2016.
- [15] Veloso Bruno, “Evolução ADSL para GPON e 4G,” 2016.
- [16] M. Serrão, “Implementação de uma rede de difusão ótica de TV no Município do Porto,” 2017.
- [17] F. Coppinger and D. Piehler, “RF video overlay in an ethernet passive optical network,” in *2006 Optical Fiber Communication Conference, and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference*, 2006, vol. 2006. doi: 10.1109/ofc.2006.215756.
- [18] ResearchGate, “GPON Network with RF Video Overlay,” 2001. [https://www.researchgate.net/figure/GPON-Network-with-RF-Video-Overlay\\_fig18\\_260399363](https://www.researchgate.net/figure/GPON-Network-with-RF-Video-Overlay_fig18_260399363) (accessed Nov. 26, 2022).

- [19] C. H. Lee, W. v. Sorin, and B. Y. Kim, "Fiber to the home using a PON infrastructure," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4568–4583, Dec. 2006, doi: 10.1109/JLT.2006.885779.
- [20] G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento, "Ethernet PON (ePON): Design and Analysis of an Optical Access Network," 2001.
- [21] F. Effenberger *et al.*, "An Introduction to PON Technologies," 2007.
- [22] J. Salvador and A. Pla, "DESIGN OF PASSIVE OPTICAL NETWORK," 2011.
- [23] B. Veloso, "Evolução ADSL para GPON e 4G," 2016.
- [24] A. Miguel Barata da Eira, "Planning and Conception of Next-Generation Optical Access Networks."
- [25] J. Salvador and A. Pla, "DESIGN OF PASSIVE OPTICAL NETWORK," 2011.