



**Universidade de  
Aveiro  
2009**

Departamento de Electrónica,  
Telecomunicações e Informática (DETI)

**Tiago José Mónica  
Carvalho**

**Uso das camadas físicas e de acesso para  
mapeamento de redes PON**



**Universidade de  
Aveiro  
2009**

Departamento de Electrónica,  
Telecomunicações e Informática

**Tiago José Mónica  
Carvalho**

**Uso das camadas físicas e de acesso para  
mapeamento de redes PON**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. António Teixeira e do Dr. Mário Lima, ambos do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática e do Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro.

## **o júri**

presidente

Prof. Dr. José Rodrigues Ferreira da Rocha

vogais

Dr. Ruben Soares Luís

Investigador do Centro de Vulcanologia da Universidade dos Açores

Prof. Dr. António Luís Jesus Teixeira

Professor Associado da Universidade de Aveiro (Orientador)

Prof. Dr. Mário José Neves de Lima

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Co-Orientador)

## **agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos orientadores Dr. António Teixeira e Dr. Mário Lima pela oportunidade de realizar este trabalho e por todo o apoio e tempo dispendido.

A Liliana Costa o meu agradecimento pela disponibilidade e sugestões.

Um especial agradecimento aos meus pais, namorada e a todos os meus familiares e amigos por todo o apoio e confiança transmitida.

**palavras-chave**

Comunicações ópticas, redes ópticas passivas, GPON, redes híbridas WDM/TDM, alarmes, detecção de falhas.

**resumo**

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre as potencialidades que as camadas física e de convergência em redes de acesso passivas proporcionam para a implementação de estratégias para a monitoria e protecção deste tipo de redes.

Os alarmes e mensagens PLOAM (Physical Layer Operations, Administration and Maintenance) existentes são identificados e caracterizados tendo em vista a motivação desta dissertação. São derivados algoritmos e regras de utilização dessas informações em conjunto com outras que se podem obter da camada física para identificar e caracterizar os problemas da rede. Este conjunto de regras e análise são concretizados numa rede anel-árvore passiva por forma a validar a sua aplicabilidade e interesse. Com isto foi possível analisar o tipo de falha ocorrida: falha de serviço ou degradação do sinal e localizar a secção da rede onde ocorreu a falha.

**keywords**

Optical communications, passive optical networks, GPON, hybrid WDM/TDM networks, alarms, fault detection.

**abstract**

This work presents a study about the potential that the physical layer and convergence layer in passive access networks provide for the implementation of strategies to allow monitoring and protection of these networks.

Existing alarms and PLOAM (Physical Layer Operations, Administration and Maintenance) messages are identified and characterized with the purpose of motivation of this thesis. Algorithms and procedures for the use of this information are derived together with other information that can be obtained from the physical layer to identify and characterize network problems. This set of rules and analysis are implemented in a ring-tree passive network in order to validate its applicability and interest. Thus, it was possible to analyze the type of failure occurred: service disruption or signal degradation and locate the network section where the fault occurred.

# Índice

Lista de Figuras e Tabelas .....	iii
Lista de Acrónimos .....	v
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1. Motivação .....	- 1 -
1.2. Estrutura e Objectivos .....	- 2 -
1.3. Principais Contribuições .....	- 3 -
<b>CAPÍTULO 2. STANDARDS DE TRANSMISSÃO .....</b>	<b>- 5 -</b>
2.1. Introdução .....	- 5 -
2.2. ATM PON e Broadband PON .....	- 6 -
2.3. Ethernet PON .....	- 8 -
2.4. Gigabit-capable PON .....	- 12 -
2.4.1. Características GPON .....	- 12 -
2.4.2. Convergência de transmissão .....	- 14 -
2.4.3. Estrutura do Frame Downstream .....	- 16 -
2.4.4. Estrutura do Frame Upstream .....	- 17 -
2.4.5. Mensagens PLOAM .....	- 18 -
2.4.6. Alarmes e Performance Monitoring .....	- 19 -
<b>CAPÍTULO 3. ARQUITECTURAS E MULTIPLEXAGEM .....</b>	<b>- 21 -</b>
3.1. Arquitecturas de Rede .....	- 21 -
3.1.1. Ligações ponto-a-ponto .....	- 22 -
3.1.2. Ligações ponto-multiponto .....	- 23 -
3.2. Tecnologia de Transmissão óptica em PONs .....	- 27 -
3.2.1. Time Division Multiplexing .....	- 28 -
3.2.2. Wavelength Division Multiplexing .....	- 29 -
3.2.3. PONs WDM/TDM Híbridas .....	- 30 -
<b>CAPÍTULO 4. FALHAS NA TRANSMISSÃO ÓPTICA .....</b>	<b>- 33 -</b>
4.1. Degradação e falhas na transmissão óptica .....	- 33 -
4.1.1. Falhas de Componentes .....	- 33 -

4.1.2. Degradação da qualidade de transmissão na camada física.....	- 39 -
Efeitos lineares.....	- 39 -
Efeitos não lineares.....	- 41 -
4.2. Equipamento de monitorização .....	- 42 -
4.2.1. Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) .....	- 44 -
4.3 Principais Cenários .....	- 46 -
4.3.1. Rede em anel WDM .....	- 46 -
4.3.2. Rede em árvore TDM-PON.....	- 47 -
4.3.3. Rede híbrida em anel WDM com árvore TDM .....	- 47 -
CAPÍTULO 5. INFORMAÇÃO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALHAS .....	- 51 -
5.1. Identificação de falha.....	- 52 -
5.2. Aplicação em cenários .....	- 54 -
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	- 61 -
6.1. Conclusões.....	- 61 -
6.2. Trabalho Futuro .....	- 62 -
REFERÊNCIAS .....	- 63 -



# Lista de Figuras e Tabelas

## Capítulo 2.

Figura 2.1: História do desenvolvimento do TDM-PON [1].

Figura 2.2: Formato dos frames APON [3].

Figura 2.3: Transmissão Downstream em EPON [5].

Figura 2.4: Transmissão Upstream em EPON [5].

Figura 2.5: Camadas G-PON [6].

Figura 2.6: Relação entre portos GEM e T-CONTs [7].

Figura 2.7: Organização do bloco PCBd [6].

Figura 2.8: Detalhes dos Overheads US [6].

Tabela 2.1: Alarmes para monitorização de falhas.

## Capítulo 3.

Figura 3.1: Topologias de rede suportadas por tecnologia óptica [13].

Figura 3.2: Topologia em Barramento (*1:2 tap couplers*) [10].

Figura 3.3: Topologia em anel com árvore de acesso [10].

Figura 3.4: Abordagens FTTH. (a) Ligação ponto-a-ponto. (b) Rede óptica com componentes activos. (c) Rede óptica passiva TDM. (d) Rede óptica passiva WDM [1].

Figura 3.5: Exemplo de topologia híbrida WDM/TDM [3].

## Capítulo 4.

Figura 4.1: Traço característico de um OTDR [19].

Figura 4.2: Exemplo de rede em árvore TDM-PON [1].

Figura 4.3: Exemplo de uma rede híbrida WDM/TDM [SARDANA].

Tabela 4.1: Capacidades de alarme de componentes ópticos [17].

Tabela 4.2: Características de alarme de medidor de potência óptica e analisador de espectro óptico [17].

Tabela 4.3: Funções e Actividades de Manutenção Óptica (ITU-T).

Tabela 4.4: Degradação de performance nos componentes.

## **Capítulo 5.**

Figura 5.1: Sistema de detecção de falhas.

Figura 5.2: Rede híbrida em anel WDM com árvores TDM.

Figura 5.3: Alarmes importantes emitidos. (a) Problema no ONU<sub>1</sub> ou ramo k. (b) Problema no splitter ou ramo j.

Figura 5.4: Comutação de caminho para restauro do funcionamento da rede.

Figura 5.5: Método de localização de uma falha numa rede híbrida.

Tabela 5.1: Alarmes para detecção de falhas em determinado componente.

# Lista de Acrónimos

<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard
<b>APON</b>	ATM over Passive Optical Network
<b>APS</b>	Automatic Protection Switching
<b>ASE</b>	Amplifier Spontaneous Emission
<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode
<b>AWG</b>	Arrayed Waveguide Grating
<b>BER</b>	Bit Error Ratio
<b>BIP</b>	Bit Interleaved Parity
<b>BPON</b>	Broadband Passive Optical Network
<b>BW</b>	Bandwidth
<b>BWmap</b>	Bandwidth Map
<b>CO</b>	Central Office
<b>CPL</b>	Change Power Level
<b>CWDM</b>	Coarse Wavelength Division Multiplexing
<b>DBA</b>	Dynamic Bandwidth Assignment
<b>DBRu</b>	Dynamic Bandwidth Report upstream
<b>DS</b>	Downstream
<b>DWDM</b>	Dense Wavelength Division Multiplexing
<b>EDFA</b>	Erbium Doped Fiber Amplifier
<b>EPON</b>	Ethernet Passive Optical Network
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>FSAN</b>	Full Service Access Network
<b>FTTH</b>	Fiber to the Home
<b>FWM</b>	Four Wave Mixing
<b>GEM</b>	G-PON Encapsulation Method
<b>GPON</b>	Gigabit Passive Optical Network
<b>GTC</b>	G-PON Transmission Convergence
<b>GVD</b>	Group Velocity Dispersion
<b>HEC</b>	Header Error Control

<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>IPTV</b>	Internet Protocol Television
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>LCDA</b>	Loss of Channel Delineation for ATM
<b>LCDG</b>	Loss of Channel Delineation for GEM
<b>LLID</b>	Logical Link Identifier
<b>LOA</b>	Loss of Acknowledgement
<b>LOAM</b>	Loss of OAM
<b>LOF</b>	Loss of Frame
<b>LOS</b>	Loss of Signal
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>MIB</b>	Management Information Base
<b>MIS</b>	(link) Mismatch
<b>NG-PON</b>	Next Generation Passive Optical Network
<b>OADM</b>	Optical Add Drop Multiplexer
<b>OAM</b>	Operations, Administration and Maintenance
<b>OEO</b>	Optic-Electric-Optic
<b>OLT</b>	Optical Line Termination
<b>OMCI</b>	ONU Management and Control Interface
<b>ONT</b>	Optical Network Termination
<b>ONU</b>	Optical Network Unit
<b>ONU-ID</b>	ONU Identifier
<b>OPM</b>	Optical Performance Monitoring
<b>OSNR</b>	Optical Signal to Noise Ratio
<b>OTDR</b>	Optical Time Domain Reflectometer
<b>PCBd</b>	Physical Control Block downstream
<b>PEE</b>	Physical Equipment Error
<b>PLOAM</b>	Physical Layer OAM
<b>PLOu</b>	Physical Layer Overhead upstream
<b>PLSu</b>	Power Leveling Sequence upstream
<b>PMD</b>	Physical Media Dependent
<b>PON</b>	Passive Optical Network

<b>Port-ID</b>	Port Identifier
<b>PST</b>	PON Section Trace
<b>Psync</b>	Physical Synchronization
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RDI</b>	Remote Defect Indication
<b>REI</b>	Remote Error Indication
<b>RN</b>	Remote Node
<b>SD</b>	Signal Degrade
<b>SDH</b>	Synchronous Digital Hierarchy
<b>SF</b>	Signal Fail
<b>SOA</b>	Semiconductor Optical Amplifier
<b>SPM</b>	Self-Phase Modulation
<b>TC</b>	Transmission Convergence
<b>T-CONT</b>	Transmission Container
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TF</b>	Transmitter Failure
<b>TPON</b>	Telephony over Passive Optical Network
<b>US</b>	Upstream
<b>VDSL2</b>	Very-High-Bit-Rate Digital Subscriber Line 2
<b>VoD</b>	Vídeo on Demand
<b>VPN</b>	Virtual Private Line
<b>WAN</b>	Wide Area Network
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing
<b>WDMA</b>	Wavelength Division Multiple Access
<b>XPM</b>	Cross Phase Modulation

# Capítulo 1. Introdução

## 1.1. Motivação

Em instalação contínua desde o início dos anos 80, as redes ópticas foram motivadas por desenvolvimentos em várias áreas como a óptica, materiais, tecnologia e ainda devido às propriedades únicas da fibra óptica como a elevada largura de banda, pouca atenuação e imunidade à interferência electromagnética. Contudo, instalações iniciais eram baseadas em fibra de sílica com um único comprimento de onda modulado a baixas taxas de transmissão, mas rapidamente foi demonstrado que o potencial da fibra superava em termos de largura de banda qualquer outro meio de transmissão. A partir desse momento as comunicações ópticas evoluíram de modo a incluir novas tecnologias como *gratings*, filtros ópticos, multiplexers ópticos e amplificadores ópticos, hoje é possível o transporte de dados a elevadas taxas de transmissão que excedem os Tbps em canais com múltiplos comprimentos de onda (WDM).

As redes ópticas continuarão a evoluir até se tornarem totalmente reconfiguráveis e completamente ópticas com conversão de comprimentos de onda e *routing*. Porém, este aumento da capacidade disponível pode ser traído pela elevada quantidade de informação que é perdida quando ocorre uma falha, dado que vários canais são interrompidos. O rápido restabelecimento da rede e identificação da falha são portanto vitais para assegurar o bom desempenho e uma operação segura nas redes ópticas. Esta detecção e localização de falhas é dificultada por diversos factores como a falta de interoperabilidade entre as

várias camadas da rede, o elevado número de alarmes que uma única falha pode gerar, a dificuldade de detecção de algumas falhas, a necessidade de lidar com alarmes perdidos ou falsos e a ocorrência de falhas simultâneas. Assim, com o rápido desenvolvimento dos standards para redes ópticas passivas surge a necessidade de identificação de potencialidades que as camadas física e acesso proporcionam para a implementação de estratégias de modo a permitir uma monitoria nas redes PON.

## 1.2. Estrutura e Objectivos

Este documento está dividido em seis capítulos relacionados com redes ópticas, nomeadamente os standards de transmissão para redes passivas, as diferentes arquitecturas e técnicas de multiplexagem mais importantes, degradação e falhas na transmissão óptica e métodos para a monitorização e localização de problemas em cenários.

No primeiro capítulo é apresentado o contexto do trabalho juntamente com os objectivos e temas abordados.

O segundo capítulo apresenta um estudo da evolução dos vários standards de transmissão para redes ópticas passivas (APON, BPON, EPON e GPON) com especial foco na camada *Transmission Convergence* do GPON, estrutura dos frames, mensagens PLOAM e alarmes.

No terceiro capítulo são identificadas as várias arquitecturas de rede que permitem serviços FTTH, bem como as principais tecnologias de transmissão óptica TDM, WDM e também topologias híbridas.

No quarto capítulo são apresentadas falhas que podem ocorrer nos vários componentes ópticos e as capacidades de alarme dos mesmos. São também analisados efeitos que afectam a qualidade da transmissão óptica, e que podem ser lineares ou não lineares. São ainda apresentados alguns equipamentos de monitorização com principal incidência no OTDR. Por fim é realizada uma breve descrição dos principais cenários para aplicação em redes ponto-multiponto e são apresentados alguns problemas que podem causar degradação numa rede híbrida em anel WDM com árvore TDM.

No quinto capítulo são analisados os alarmes e mensagens PLOAM existentes no standard GPON para a identificação, localização e restauro de uma falha de serviço e

degradação na rede. Por último, é efectuada a aplicação desta informação numa rede híbrida de modo a identificar e localizar um problema numa determinada parte constituinte da rede.

### 1.3. Principais Contribuições

Na opinião do autor, as principais contribuições deste trabalho são as seguintes:

- Estudo da informação existente na camada TC do standard GPON para monitorização em redes PON.
- Estado da arte de arquitecturas de rede e tecnologia de transmissão.
- Análise extensiva de falhas em componentes ópticos e sua capacidade de alarme.
- Aplicação da informação para monitorização num método de localização de falhas numa rede híbrida.



## Capítulo 2. Standards de Transmissão

### 2.1. Introdução

A crescente necessidade de elevada largura de banda para os clientes deve-se, para além da Internet de alta velocidade, ao aparecimento de novos serviços como televisão (IPTV) e *vídeo on demand* (VoD). O XDSL permite satisfazer a necessidade de largura de banda (VDSL2) mas apresenta restrições quanto à distância. A implementação da fibra óptica até ao cliente (FTTx) surge assim como solução mais adequada para as exigências de banda larga com longo alcance, através do uso de algum tipo de rede óptica passiva (PON). Uma PON é uma rede ponto-multiponto que usa divisão óptica em downstream para a transmissão do tráfego desde o *Optical Line Terminal* (OLT) para todos os equipamentos terminais, designados de *Optical Network Terminals* (ONTs) ou *Optical Network Units* (ONUs). Na direcção de upstream, o OLT ou um nó, controla a transmissão de cada ONU/ONT para a fibra partilhada.

Ao longo dos últimos anos as PONs tiveram grandes progressos em termos de standardização e implantação (figura 2.1). Actualmente existem especificações PON baseadas em ATM (APON e BPON), Ethernet (EPON) e *generic framing procedure* (GPON).

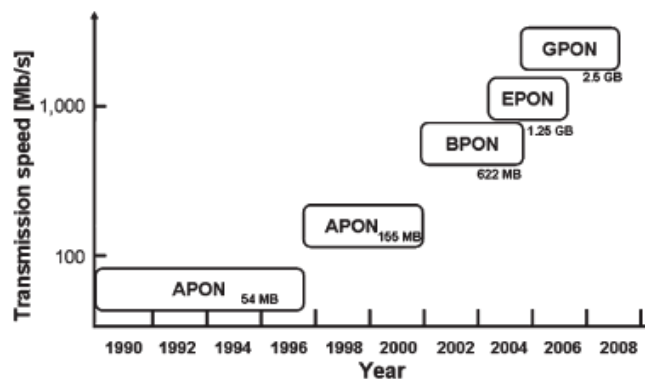


Figura 2.1: História do desenvolvimento do TDM-PON [1].

## 2.2. ATM PON e Broadband PON

Em 1995, membros da FSAN desenvolveram uma especificação para redes de acesso ópticas baseada em PON que utiliza o ATM como protocolo de segunda camada. A estes sistemas deu-se o nome de APON como abreviatura para ATM PON. Mais tarde o nome APON foi substituído por BPON, de Broadband PON. Esta mudança de nome deriva da alteração do suporte do sistema de serviços broadband, tais como, acesso à Ethernet, distribuição vídeo e VPN.

### Standard APON

Este standard foi desenvolvido por uma aliança de *service providers* e construtores de equipamentos e especifica uma arquitectura TPON baseada em ATM com uma largura de banda para DS até 622 Mbps e uma largura de banda para US até 155 Mbps. A distância máxima de cobertura é de 20 km, com uma atenuação total entre 10 e 30 db (FSAN). Os valores práticos do *link power budget* permitem uma divisão de potência de 16 ou 32 no nó remoto. Como exemplo, APON a operar a 622 Mbps com um splitter de 32 pode fornecer uma taxa de dados de 20 Mbps a cada cliente. O APON pode operar sobre uma única fibra, usando um comprimento de onda para US (1,3  $\mu\text{m}$ ) e outro para DS (1,55  $\mu\text{m}$ ), ou sobre um par de fibras necessitando apenas transmissores de 1,3  $\mu\text{m}$ .

## A rede de Acesso APON

O APON é baseado na camada MAC do protocolo ATM. O frame DS apresentando na figura 2.2 consiste em 56 células ATM (de 53 bytes cada) para uma taxa básica de 155 Mbps, podendo atingir 224 células para 662 Mbps. Existem duas células dedicadas, uma no início do frame e a outra a meio, intituladas *Physical Layer Operation, Administration and Maintenance* (PLOAM) que são responsáveis pela alocação de largura de banda, sincronização, controlo de erros, segurança, *ranging* e manutenção. As restantes 54 células são células de dados ATM.

A transmissão US é feita na forma de rajadas de células ATM com um overhead de 3 bytes adicionados a cada célula de 53 bytes, de modo a permitir receptores em modo rajada. Estes receptores são necessários no OLT para a sincronização com os diferentes ONUs que podem estar localizados a diferentes distâncias do OLT.

No que respeita à transmissão DS, as células PLOAM são usadas para o transporte de *grants* do OLT para os ONUs. Cada *grant* é uma permissão única para um ONU transmitir carga útil em cada célula ATM. Nas células PLOAM são mapeados 53 *grants* para os 53 frames US. O OLT envia um fluxo contínuo de *grants* para todos os ONUs da rede PON, permitindo assim o controlo da quantidade de largura de banda US atribuída a cada ONU.

Na direcção US as células PLOAM são usadas pelos ONUs para transmitir os tamanhos das suas filas de espera ao OLT. Esta informação deve ser usada pelo OLT para a alocação de largura de banda [2].

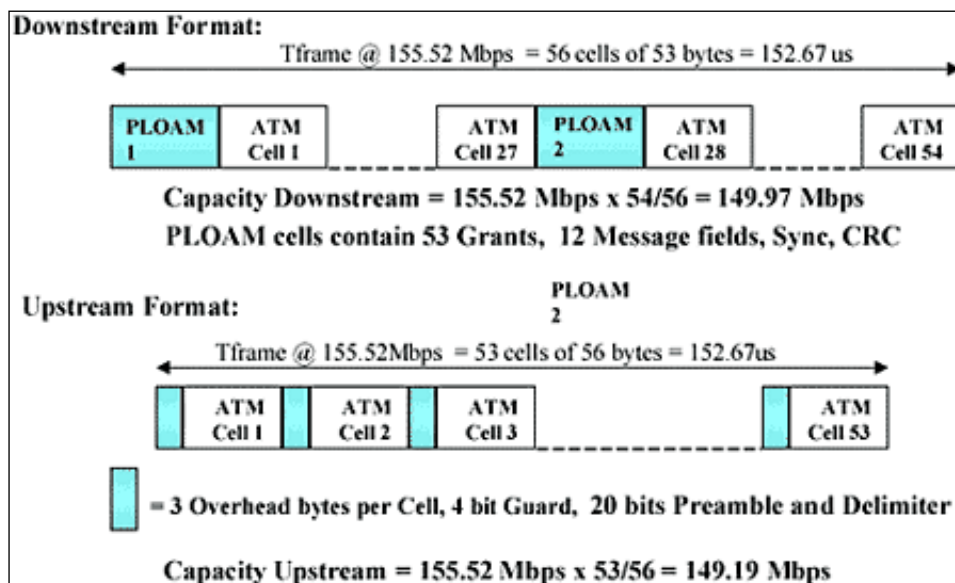


Figura 2.2: Formato dos frames APON [3]

Mais tarde, foi desenvolvida uma extensão adicional ao APON denominada Broadband PON (BPON). O BPON foi estandardizado pela ITU na especificação G.983 [4], fornecendo capacidades de *overlay* para serviços como vídeo e tráfego Ethernet.

A recomendação original G.983.1 especificava uma arquitectura BPON com bit rates simétricos a 155 Mbps para US e DS. Esta especificação foi alterada em 2001 de modo a permitir transmissões assimétricas a 155 Mbps para US e 622 Mbps para DS, assim como transmissões simétricas a 622 Mbps.

## 2.3. Ethernet PON

Quando foi desenvolvido, o standard APON não era a solução mais adequada para o acesso local em larga escala, pois não incluía a capacidade de transporte de vídeo. A evolução das LANs para gigabit Ethernet e 10-gigabit Ethernet motiva a eliminação da necessidade de conversão entre os protocolos IP e ATM na interligação das LANs para as WANs.

Em 2000, um grupo de fabricantes de equipamentos Ethernet iniciou o desenvolvimento de um standard denominado Ethernet PON no âmbito de um acordo com o IEEE, resultando na criação do grupo de estudo *Ethernet in the First Mile* em 2001. Este

grupo, focando-se nas redes de acesso residencial e empresarial e mantendo a tradição da tecnologia Ethernet definiu o objectivo de proporcionar um aumento significativo no desempenho e minimizar os custos de equipamento, de operação e manutenção.

O standard IEEE 802.3 Ethernet PON (EPON ou GEPON) foi concluído em 2004. Este é aplicável para redes fundamentalmente de dados, como para redes multi-serviço, voz, dados e vídeo. Actualmente está a ser desenvolvida pelo IEEE uma evolução do EPON, o standard 10G-EPON (IEEE P802.3av) que permite taxas de 10 Gbps para DS e 1Gbps/10Gbps para US.

A tecnologia Ethernet PON baseia-se numa rede PON que transporta tráfego de dados encapsulado em frames Ethernet. Usa um padrão de 8b/10b para codificação de linha (8 bits de dados codificados como 10 bits de linha). O EPON fornece uma taxa de transmissão bidireccional de 1,25 Gbps com comprimentos de onda de 1490nm para DS e 1310nm para US e 1550nm reservado para exigências futuras. Sempre que possível é utilizada a especificação EPON 802.3 existente incluindo a utilização do actual 802.3 *full duplex Media Access Control* (MAC).

Embora o conceito EPON proporcione maior largura de banda, menor custo e capacidades de serviço mais abrangentes em relação ao standard APON, a arquitectura de rede é semelhante e o standard EPON está em conformidade com muitas especificações incluídas nas recomendações G.983/4 do ITU.

### **Princípio de Funcionamento**

Na direcção DS, os frames Ethernet são transmitidos pelo OLT através de um splitter passivo 1:N até ao ONU. O valor de N pode variar entre 4 e 64. Os pacotes enviados pelo OLT são broadcast, sendo depois extraídos pelo ONU destino usando um identificador do tipo LLID (Logical Link Identifier). Este ID é atribuído aquando do registo do ONU na rede. A figura 2.3 mostra o tráfego DS em EPON. Na direcção US os frames de dados provenientes de qualquer ONU apenas vão alcançar o OLT e não os outros ONUs devido a propriedades direccionais do splitter óptico.

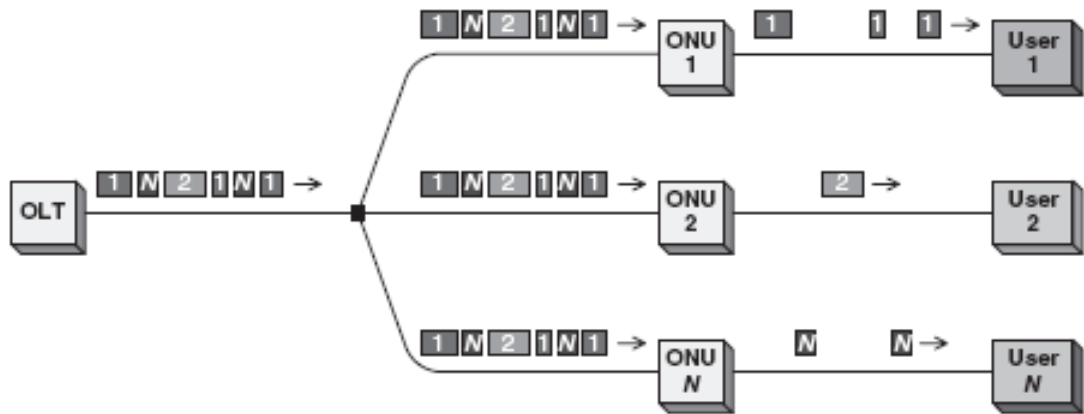


Figura 2.3: Transmissão Downstream em EPON [5]

No que respeita à direcção US, o comportamento é semelhante à arquitectura ponto-a-ponto. Contudo, ao contrário de uma rede verdadeiramente ponto-a-ponto, em EPON os frames de dados transmitidos simultaneamente de vários ONUs podem dar origem a colisões. Assim, para evitar colisões de dados e permitir uma justa partilha da capacidade do canal na direcção de US, os ONUs necessitam de mecanismos de arbitragem. Um mecanismo de acesso *contention-based* (semelhante ao CSMA-CD) é de difícil implementação, uma vez que não é possível ao ONU uma detecção de colisão na fibra do splitter para o OLT. O OLT pode detectar uma colisão e informar os ONUs enviando um sinal de congestionamento, no entanto, atrasos na propagação em PON reduzem extremamente a sua eficiência.

A figura 2.4 ilustra um fluxo de dados US partilhado no tempo em EPON.

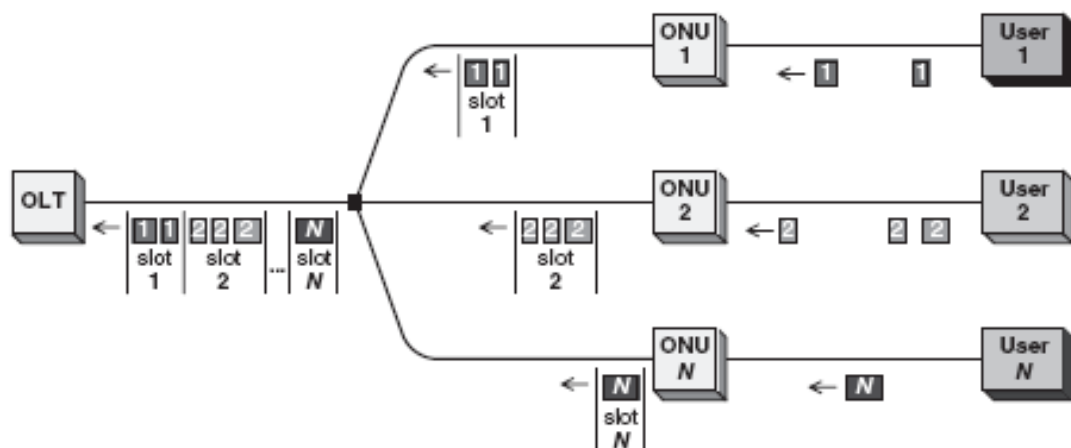


Figura 2.4: Transmissão Upstream em EPON [5]

Todos os ONUs são sincronizados com uma referência de tempo comum e a cada um é alocado um intervalo de tempo (*timeslot*) para a transmissão, podendo este transportar vários frames Ethernet. O ONU armazena os frames num buffer até chegar o seu *timeslot*, enviando de seguida os frames armazenados à velocidade máxima do canal. Os esquemas possíveis para a alocação de *timeslots* podem ir desde uma alocação estática (TDMA) até um esquema de adaptação dinâmica baseado no tamanho da fila de espera em cada ONU. Neste último o OLT pode desempenhar o papel de recolher os tamanhos das filas de espera dos ONUs e depois atribuir os *timeslots*. Embora esta abordagem introduza uma maior sobrecarga de sinalização entre o OLT e os ONUs, conduz a um uso mais eficiente da largura de banda. Outros esquemas mais avançados para alocação de largura de banda são possíveis, utilizando inclusive noções de prioridade de tráfego, *Quality of Service* (QoS), *Service-Level Agreements* (SLAs) entre outros [2].

### ***Multi-Point Control Protocol (MPCP)***

O Multi-Point Control Protocol é um protocolo de apoio ao esquema de alocação dinâmica de *timeslots*. Desenvolvido pelo IEEE EFM, o MPCP visa definir um protocolo para sinalização entre OLT e ONUs, não definindo no entanto um esquema de provisão de largura de banda.

O MPCP consiste nas três funções seguintes: *Discovery Processing*, *REPORT Handling* e *GATE Handling*. Na etapa *Discovery Processing* um ONU é encontrado e registado na rede, é também medido o tempo de ida e volta (RTT) de um sinal desde o OLT até ao ONU. Na fase *REPORT Handling* os ONUs geram mensagens REPORT nas quais são transmitidos os requisitos de largura de banda ao OLT. O OLT processa estas mensagens para poder fazer atribuições de largura de banda. No estado *GATE Handling* as mensagens GATE são usadas pelo OLT para conceder um intervalo de tempo no qual é permitido ao ONU a transmissão de dados. Estes intervalos são processados no OLT enquanto são feitas alocações de largura de banda.

Recentemente, as redes de acesso baseadas em EPON tornaram-se um tema importante tanto na indústria como na investigação académica. Os interesses industriais prendem-se com o facto de o EPON ser a primeira tecnologia óptica a prometer uma

relação custo-eficiência suficiente para justificar a sua implementação em massa numa rede de acesso.

## 2.4. Gigabit-capable PON

### 2.4.1. Características GPON

O Gigabit Passive Optical Network é definido por uma serie de recomendações da ITU-T (G.984.1 até G.984.4).

A recomendação G.984.1 especifica as características genéricas da arquitectura GPON. Estas são baseadas na série G.983 de modo a permitir compatibilidade com ambientes existentes. O GPON possui sete combinações de taxas de transmissão: 1.244 Gbps para DS combinados com 155 Mbps, 622Mbps ou 1.244 Gbps para US ou 2.488 Gbps para DS combinados com 155 Mbps, 622 Mbps, 1.244 Gbps ou 2.488 Gbps para US. A combinação mais utilizada pelos operadores para a taxa de transmissão é de 1.244Gps para US e de 2.488 Gbps para DS. O alcance físico do GPON é ate 20 km, suportando também um alcance lógico até 60 km, para permitir suporte futuro de sistemas de longo alcance usando por exemplo amplificadores ópticos. Apresenta *split ratios* até 1:64 e uma antecipação para *split ratio* de 1:128 no protocolo MAC. Logo que os componentes ópticos permitam este elevado *split ratio*, os produtos GPON definidos são adaptados para o suporte desta evolução no número de ONTs/ONUs geridos por um único OLT. A recomendação G.984.2 foca-se na camada *physical media dependent* representada na figura 2.5.



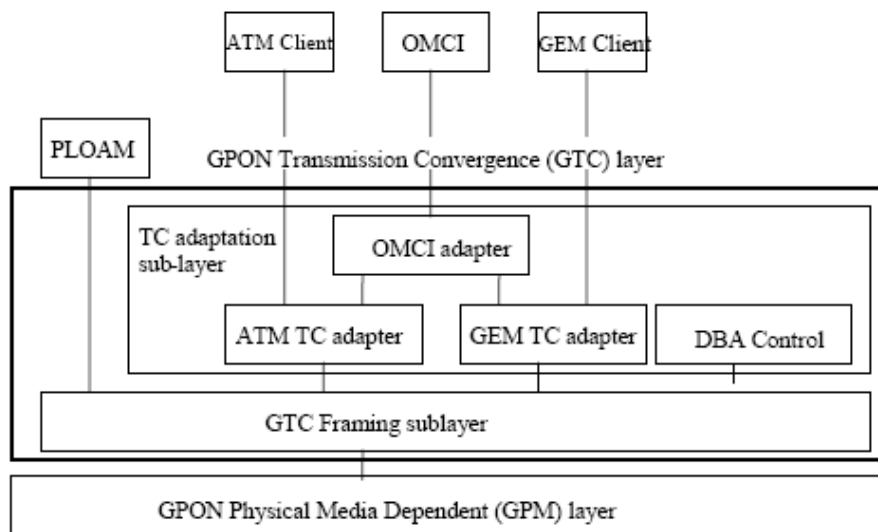


Figura 2.5: Camadas G-PON [6]

Como PON é uma tecnologia de rede passiva, os elementos da rede não amplificam o sinal e é necessário ter em conta as limitações práticas do *power budget*. De acordo com a CTS (*Common Technical Specification*) para GPON, todas as *access carriers* exigem *Class B+* (atenuação no intervalo de 13 a 28 dB).

Assim como no caso do BPON, o GPON tanto pode ser um sistema de uma ou duas fibras. O comprimento de onda de operação para DS num sistema de fibra única encontra-se na faixa dos 1480-1500 nm, em conformidade com G.983.3. Para um sistema com duas fibras o comprimento de onda de operação para DS usado encontra-se na faixa dos 1260-1360 nm. O comprimento de onda de operação para US encontra-se na faixa 1260-1360 nm para um sistema de uma ou duas fibras.

A recomendação G.984.2 especifica também uma banda de comprimento de onda adicional sobre GPON que pode ser usada para distribuição DS de vídeo RF, usando WDM (*Wavelength Division Multiplexing*).

Na recomendação G.984.4 é especificada a interface de gestão entre o OLT e o ONT/ONU, desenvolvida adicionalmente às especificações BPON. Assim, usando esta interface de controlo e gestão do ONT (OMCI) é possível a gestão dos ONTs/ONUs. As especificações OMCI contêm uma descrição das entidades geridas de um protocolo independente MIB que modela as trocas entre OLT e ONT abrangendo também o canal de gestão e controlo do ONT, o protocolo, e mensagens detalhadas. O OMCI permite ao OLT estabelecer e libertar conexões através do ONT, gerir os UNIs no ONT, solicitar

informações de configuração e estatísticas de desempenho e informar o operador de sistema de ocorrências tais como falhas de ligação.

#### **2.4.2. Convergência de transmissão**

A recomendação G.984.3 especifica a camada GPON *Transmission Convergence*. Inclui especificações para o formato dos frames, procedimentos para *ranging*, protocolo MAC e segurança.

##### **Sincronização/*Ranging***

O uso de *framing* fixo a 125  $\mu$ s para o sinal DS serve como base para as relações temporais em todo o sistema GPON. Uma vez que é utilizado TDMA na direcção US e a distância entre o OLT e cada ONU varia, todos os ONUs necessitam de ser sincronizados de modo a garantir o transporte sem colisões, criando um intervalo de tempo para a transmissão do frame US. Durante a activação e registo inicial, o OLT utiliza um procedimento chamado *ranging* de modo a calcular o atraso apropriado que cada ONT/ONU deve inserir relativamente ao frame DS recebido, com o objectivo de sincronizar a fase de US de todos os ONTs/ONUs na rede PON.

##### **Segurança**

Devido à natureza *broadcast* da PON, esta arquitectura passiva pode carecer de falta de privacidade, pois cada ONU tem acesso aos dados DS relativos aos outros. Para colmatar este problema de segurança, é necessário o uso de técnicas de encriptação de sinal. O GPON fornece codificação de dados e usa AES (*Advanced Encryption Standard*) para encriptar a carga útil. A chave de encriptação associada a cada ONU pode ser enviada em US uma vez nenhum outro ONU da mesma PON tem acesso a este tráfego.

## Media Access Control (MAC)

Cada burst GTC (*GPON Transmission Convergence*) de carga útil consiste num número variável de frames de encapsulamento ATM e/ou GEM (*GPON Encapsulation Method*). Com o GEM é possível o transporte de frames Ethernet assim como tráfego TDM, ambos nos seus formatos nativos, pois consiste numa modificação do protocolo de transporte de pacotes proveniente da estrutura SDH/SONET, denominado *Generic Framing Procedure* (GFP) e especificado no standard ITU-T G.7041. Cada ramo GPON pode ser então configurado apenas com ATM, GEM, ou ambos. Além disso, no modo GEM, o operador possui ainda a escolha do transporte de frames Ethernet ou TDM. Um *GEM port* é uma conexão bidireccional identificada pelo *port ID* e usada para o transporte de um fluxo de serviços de utilizador entre um ONT/ONU e o OLT. Todos os *GEM ports* são conexões bidireccionais ponto-a-ponto com a excepção de um que é dedicado ao transporte de *streams IPTV multicast*, que é do tipo ponto-multiponto e tem apenas significado na direcção DS. A gestão de tráfego é feita via T-CONTs conforme descrito em G.983.4. Esta entidade, identificada por um *alloc-ID*, é usada como unidade básica de controlo representando uma única fila de espera para US de um ONU que pode conter um ou vários portos GEM (Figura 2.6).

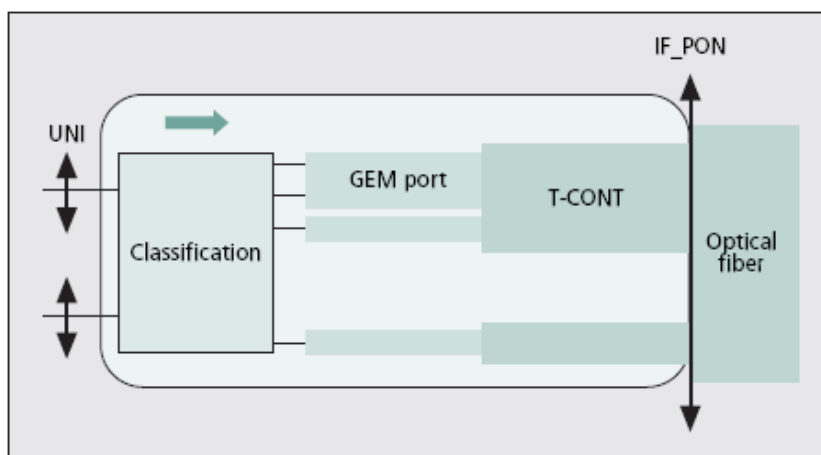


Figura 2.6: Relação entre portos GEM e T-CONTs. [7]

A alocação de largura de banda pode ser a mesma para cada frame tendo em conta uma alocação estática, ou diferente para cada frame como resposta a flutuações dinâmicas de tráfego. Esta última opção é a base da alocação dinâmica de largura de banda (DBA),

que permite uma partilha dinâmica e eficiente de largura de banda para US. Operando sobre o algoritmo de distribuição de largura de banda, o controlador MAC do OLT executa a atribuição de partes fixas e excedentes de largura de banda para as filas activas. Este resultado é alcançado calculando o número de intervalos de tempo para atribuição de largura de banda de US para cada T-CONT, quer de acordo com os relatórios de estado T-CONTs dos ONUs (*status reporting DBA*) ou baseado na monitorização dos fluxos de tráfego recebidos pelo OLT (*non-status-reporting DBA*). Quando é utilizado *status reporting DBA*, os relatórios de estado são enviados regularmente associados às transmissões US de modo a reflectir a quantidade de tráfego instantâneo à espera de largura de banda. O MAC também tem em conta o SLA que assegura parâmetros de QoS determinados pela atribuição de cada Alloc-ID a um dos cinco tipos T-CONT que seguem diferentes políticas de serviço. Após a execução do seu algoritmo MAC, o OLT coloca dentro do mapa de largura de banda US, os elementos, especificando a alocação de largura de banda. Cada um destes elementos corresponde a um T-CONT e a um par de ponteiros *start-and-stop*, definindo o intervalo de tempo variável no qual os pacotes do Alloc-ID endereçado podem ser enviados US sem existir sobreposição com os outros. De seguida, como resposta às alocações de mapa de largura de banda de US, os blocos concedidos de cada T-CONT serão enviados no *burst* US.

O GPON é encarado como o standard que poderá dar origem a uma plataforma de acesso mais eficiente para os operadores poderem fornecer uma elevada largura de banda com garantias de qualidade de serviço (QoS) para todos os tipos de cliente, independentemente do protocolo usado por cada um.

### **2.4.3. Estrutura do Frame Downstream**

O protocolo para transferência de informação foi concebido para responder aos requisitos de um sistema ponto-multiponto e utilizar ao máximo a largura de banda disponível na rede.

O frame DS é composto pelo bloco *physical control block downstream* (PCBd), pela partição ATM e partição GEM. A figura 2.7 mostra a organização do bloco PCBd.

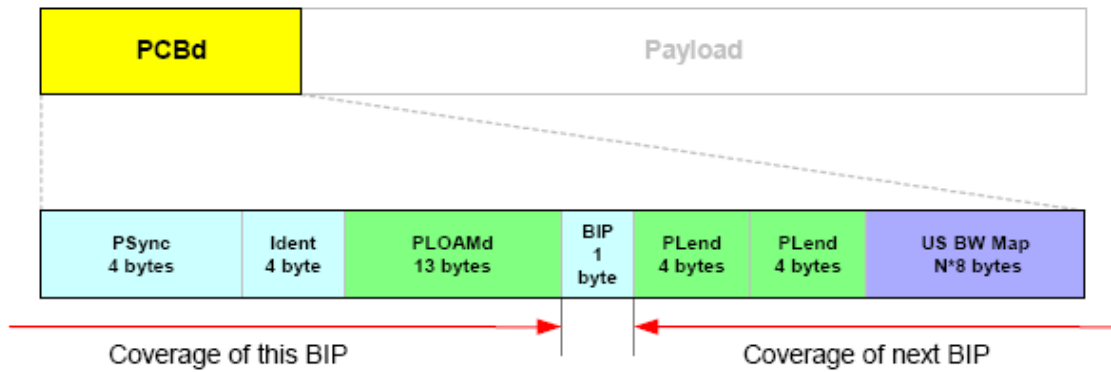


Figura 2.7: Organização do bloco PCBd [6]

O PCBd é enviado pelo OLT em modo *broadcast*. Após a recepção pelos ONUs de todo o PCBd, estes actuam sobre as informações relevantes nele contidas. O primeiro campo, PSync, refere-se ao padrão usado para a sincronização do frame. O campo seguinte, Ident, fornece informação estática sobre a utilização ou não de *Forward Error Correction* (FEC) no frame DS. Os 30 bits restantes deste campo são usados para o processo de *ranging* e AES. O terceiro campo, ocupa 13 bytes e transporta as mensagens *Physical Layer OAM* (PLOAM) necessárias à configuração e gestão dos ONUs e da PON em geral. Um byte é utilizado para o processo BIP-8 que abrange todos os bytes do frame e dá informação sobre o número de erros na ligação. O campo seguinte, *Payload Length Indicator* (PLEnd) é enviado duas vezes por motivos de robustez e especifica o comprimento do mapa de largura de banda e o comprimento da partição ATM. O último campo, US BW Map, transporta o mapa de alocação de largura de banda US, indicando o momento de início e o momento de interrupção da alocação e contém um campo de flags onde são utilizadas 4 indicações para o ONU sobre o modo de utilização da alocação, Send PSLu, Send PLOAMu, Use FEC e Send DBRu.

#### 2.4.4. Estrutura do Frame Upstream

O tráfego US utiliza TDMA, onde o controlo é efectuado pelo OLT localizado no CO que atribui intervalos de tempo variáveis a cada ONU para sincronização da transmissão de dados. O frame US consiste em múltiplas rajadas de transmissão. De acordo com o controlo efectuado pelo OLT (flags), o ONU pode transmitir de 1 até 4 tipos de *overhead*. Os vários campos do frame US são apresentados na figura 2.8.

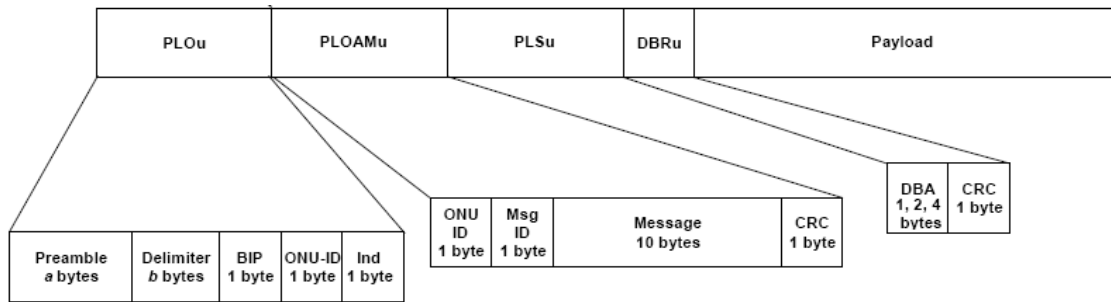


Figura 2.8: Detalhes dos Overheads US [6].

O primeiro campo, *Physical Layer Overhead upstream* (PLOu), possui um comprimento variável que depende da taxa US. Os bytes do *Preamble* e *Delimiter* assinalam o início da transmissão para o respectivo ONU. O campo BIP abrange todos os bytes do frame US transmitido. O ONU-ID indica o ONU do qual o tráfego está a ser transmitido e é atribuído pelo OLT durante a fase de registo do ONU. O último campo do bloco PLOu, *Indication*, fornece informação sobre o uso de FEC, *Remote Defect Indication* (RDI), estado do tráfego e existência de mensagens em fila de espera no ONU.

O segundo campo do frame US, PLOAMu, transporta mensagens OAM do ONU para o OLT. Apenas é enviado em resposta a um pedido do OLT ou seja quando a flag *Send PLOAMu* do campo US BW Map do frame DS está activa.

O *Power Level Sequence* (PLSu) é usado pelo ONU para o envio de informação relativa à medição de potência para o OLT. Esta informação pode ser utilizada no OLT para o ajuste dos níveis de potência do ONU e tem um comprimento de 120 bytes.

A estrutura *Dynamic Bandwidth Report Upstream* (DBRu) contém informação ligada a entidade T-CONT. O campo DBA apresenta o estado do tráfego no T-CONT em questão. Imediatamente após o último campo de *overhead* US encontra-se a carga útil. Pode ser utilizada para o transporte de células ATM, frames GEM ou relatórios DBA.

#### 2.4.5. Mensagens PLOAM

Os alarmes relacionados com OAM e alertas de transposição de limites que são accionados por vários eventos que ocorrem na rede são transportados através de mensagens no campo de 13 bytes PLOAM. Algumas destas mensagens podem ser utilizadas para

funções de monitorização na rede. Podem dar a informação de falha de serviço ou conectividade assim como permitir a detecção de degradação na rede.

A mensagem *Physical Equipment Error* (PEE) pode ser enviada DS ou US quando o OLT ou o ONU não conseguem enviar células ATM ou frames GEM. É emitido um alarme no ONU ou no OLT. Outra mensagem também enviada DS e US designa-se *PON Section Trace* (PST) e permite a verificação de conectividade ONU-OLT e no caso de estarmos presente uma rede com sobrevivência em caso de falha é realizado *Automatic Protection Switching* (APS).

Para determinação do BER no sentido DS, é enviada a mensagem *BER interval* que define um intervalo para a contagem do número de erros BIP no ONU. A contagem do número de erros detectados no intervalo definido é enviada para o OLT na mensagem *Remote Error Indication* (REI).

Quando o OLT detecta que a potência transmitida pelo ONU ultrapassa um nível predefinido através do campo PLSu, é enviada a mensagem DS *Change-Power-Level* (CPL) que indica ao ONU para aumentar ou diminuir o nível de potência transmitido.

Outros tipos de mensagens PLOAM podem ser definidos como extensão ao protocolo GPON de modo a permitir a troca de mais informação da camada física para utilização pela camada MAC.

#### **2.4.6. Alarmes e Performance Monitoring**

Os alarmes e a monitorização de performance fornecem mecanismos para a detecção de falhas na ligação e monitorização do estado e desempenho das ligações. Existem várias funções OAM instaladas no OLT e ONU que garantem sinais de notificação entre eles. A tabela 2.1 mostra os alarmes que podem ser accionados e utilizados como parâmetros de monitorização de falhas físicas ou degradação do sinal.

<b>Physical Failure (OLT)</b>	<b>Performance Degradation (OLT)</b>	<b>Physical Failure (ONU)</b>	<b>Performance Degradation (ONU)</b>
Loss of Signal (LOSi/LOS)	Loss of Frame (LOFi)	Loss of Signal (LOS)	Loss of Frame (LOF)
Transmitter Failure (TF)	Signal Fail (SFi)	Transmitter Failure (TF)	Signal Failed (SF)
Loss of Ack (LOAi)	Signal Degraded (SDi)	Physical Equipment Error (PEE)	Signal Degraded (SD)
Loss of PLOAM (LOAMi)	Loss of channel delineation (LCDAi/LCDGi)	Link Mismatch (MIS)	Loss of channel delineation (LCDA/LCDG)
Physical Equipment Error (PEEi)	Remote Defect Indication (RDi)		Remote Defect Indication (RDI)
Link Mismatch (MISi)			

Tabela 2.1: Alarmes para monitorização de falhas.

O cálculo das condições de SF e SD é feito através da contagem de violações BIP durante um determinado período de tempo que são comparadas com um nível predefinido.



## Capítulo 3. Arquitecturas e Multiplexagem

### 3.1. Arquitecturas de Rede

Na escolha de uma arquitectura de rede devem estar presentes vários factores, nomeadamente o custo associado às infra-estruturas, os serviços que são disponibilizados, infra-estruturas já existentes, a localização da rede assim como capacidade futura para adaptação a novas tecnologias.

Uma ligação por fibra óptica é estabelecida através da tecnologia ponto-a-ponto, numa extremidade encontra-se um laser ou transmissor e na outra um fotodetector ou receptor. No entanto outros componentes como regeneradores ópticos, OADMs, splitters podem ser incluídos nas ligações. Deste modo os nós da rede podem ser projectados para que uma rede óptica, além de ponto-a-ponto suporte outros tipos de topologias como anel, estrela ou árvore, apresentadas na figura 3.1. Cada topologia apresenta complexidades próprias e problemas a resolver no que diz respeito à gestão de rede, protecção, sincronização, desempenho, escalabilidade, capacidade de suporte a vários serviços, capacidade de tráfego, segurança e custo [13].

As arquitecturas de rede FTTH podem ser divididas em duas categorias principais consoante a distribuição da fibra, ponto-a-ponto e ponto-multiponto. Na arquitectura ponto-a-ponto o número de fibras é igual ao número de utilizadores, existe assim uma fibra dedicada que liga cada casa ao CO, tornando-se dispendiosa a sua instalação e controlo. Numa arquitectura ponto-multiponto vários utilizadores partilham uma linha de fibra

através de um nó específico, que pode executar funções de *active switching*, *passive power splitting* ou mux/demux de comprimentos de onda.

### **3.1.1. Ligações ponto-a-ponto**

Este tipo de ligações consiste no método mais simples de conectividade entre um *service provider* e o utilizador. O seu alcance pode variar de menos de 1 km (curta distância) até vários milhares de km (longa distância), dependendo da aplicação desejada. Devido às baixas perdas e elevada largura de banda característica da fibra óptica a arquitectura ponto-a-ponto é utilizada em ligações transoceânicas de alta taxa de transmissão pois permite uma redução do custo total de operação.

Quando a distância da ligação excede um valor entre os 20-100 km (dependendo do comprimento de onda de operação), torna-se necessária a compensação das perdas na fibra uma vez que o sinal vai sendo atenuado e seria impossível a sua detecção. Duas formas de realizar a compensação consistem na utilização de regeneradores ou amplificadores. Os regeneradores, usados até aos anos 90 implicam conversão OEO, ou seja, um receptor detecta o sinal óptico que é posteriormente recuperado na forma eléctrica e convertido novamente para um sinal óptico através da modulação de uma fonte óptica. O aparecimento de amplificadores ópticos como o SOA e EDFA constituiu uma enorme evolução nos sistemas de comunicação por fibra óptica, nomeadamente sistemas WDM onde de uma maneira simples permitem a amplificação de vários canais simultaneamente. Apesar de resolverem o problema das perdas os amplificadores ópticos introduzem ruído no sinal e pioram o impacto do fenómeno de dispersão na fibra e não linearidades. Uma vez que os regeneradores optoelectrónicos não sofrem destes problemas, é frequente a combinação das duas técnicas, em que é colocado um regenerador após um certo número de amplificadores [9].

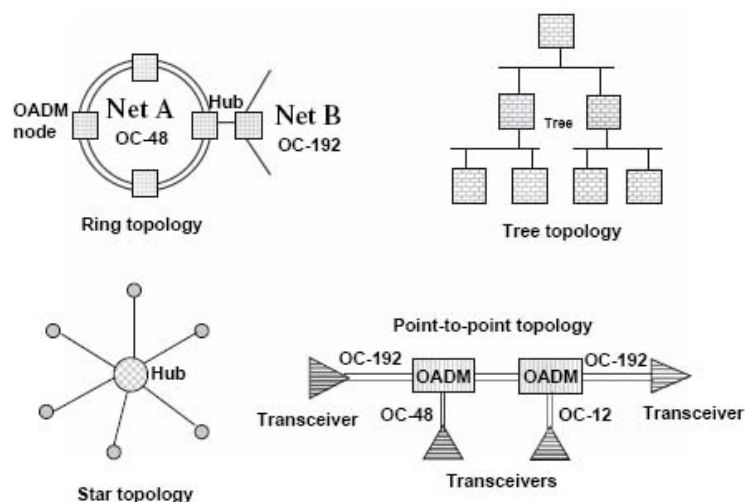


Figura 3.1: Topologias de rede suportadas por tecnologia óptica [13]

### 3.1.2. Ligações ponto-multiponto

De modo a colmatar desvantagens das arquitecturas ponto-a-ponto como o uso ineficiente de recursos da fibra e o facto de cada ligação necessitar de um laser independente no transmissor, surgem as arquitecturas ponto-multiponto nas quais uma fibra principal é utilizada e partilhada por vários utilizadores. Estas arquitecturas podem ser: Malha, Barramento, Anel e Estrela/Árvore.

#### Topologia Malha

A topologia em malha afirma-se como a mais versátil, oferecendo melhor escalabilidade pois permite uma fácil adição/remoção de nós na rede. O facto de apresentar vários caminhos alternativos para protecção, balanceamento de tráfego e estratégias de prevenção de congestionamento definem-na como a topologia com melhor protecção de serviços e a principal escolha para redes *backbone*. No entanto a tecnologia óptica deste tipo de topologias apresenta um nível de complexidade elevado e requer protocolos mais complicados para gestão de tráfego e de rede [13].

## Topologia Barramento

A topologia em barramento apresentada na figura 3.2 utiliza uma única fibra ligada ao OLT que é partilhada por vários ONUs. A ligação ao utilizador final é efectuada através de um *tap coupler* 1:2 que extrai uma pequena parte da potência que é transmitida do OLT. Apesar de o sinal sofrer consecutivas degradações e perdas ao passar nos vários acopladores e consequentemente os ONUs mais afastados do OLT receberem um sinal mais fraco e degradado, este tipo de topologia apresenta vantagens pois é a que utiliza a menor quantidade de fibra óptica e permite uma fácil adição de novos ONUs bastando apenas a instalação de mais *tap couplers*. De modo a aumentar o número de utilizadores podem ser utilizados periodicamente no barramento amplificadores ópticos para compensação de perdas [10].

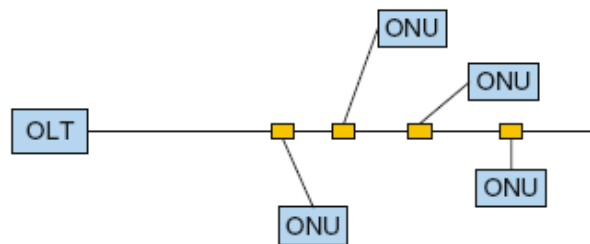


Figura 3.2: Topologia em Barramento (1:2 *tap couplers*) [10]

## Topologia Anel

Numa topologia em anel (figura 3.1), cada nó está directamente ligado a outros dois por ligações ponto-a-ponto, criando um percurso circular. A informação passa de nó em nó até chegar ao destino. Uma vez que existem dois caminhos possíveis para alcançar o OLT é possível manter uma ligação mesmo que haja um corte de fibra. Contudo apresenta o mesmo factor restritivo da topologia barramento uma vez que o sinal é degradado e atenuado quando passa nos vários ONUs.

A topologia em anel é a mais adequada para redes metropolitanas pois oferece capacidade de resiliência com um número mínimo de ligações. Pode ser tão simples quanto um anel de fibra única que conecta um número reduzido de OADMs e transporta poucos canais a 2.5 Gbps, até um anel mais complexo de quatro fibras para protecção que conecta

um elevado número de OADMs com uma taxa de transmissão de 10 Gbps por canal e se expande numa grande área ou cidade [13].

### **Topologia Estrela/Árvore**

Numa topologia em estrela (figura 3.1) todos os nós estão directamente ligados ao nó central designado de *Hub* por meio de ligações ponto-a-ponto. Se o nó central for um componente activo então todos os sinais recebidos são convertidos para o domínio eléctrico podendo assim o nó realizar funções de *Switching*. No caso de ser um componente passivo a distribuição é realizada apenas no domínio óptico por dispositivos como os acopladores direccionais. O número de ONUs que pode ser suportado pela topologia é limitado quer pelas perdas por divisão quer pela largura de banda necessária a cada utilizador. É uma arquitectura muito versátil e flexível no que diz respeito à expansão da rede. Se o número de utilizadores aumentar, a rede em estrela pode ser facilmente subdividida adicionando splitters, tornando-se numa topologia em árvore (figura 3.1), a mais utilizada em redes de acesso e que consiste numa cascata hierárquica de vários pontos de divisão. As arquitecturas mais simples utilizam TDM para transmissão de dados. A cada ONU é atribuído um intervalo de tempo para aceder ao OLT, no entanto devem ser consideradas as distâncias entre os ONUs e os pontos de divisão para transmissões upstream, de modo a evitar colisões na secção entre o OLT e o splitter.

Na topologia em árvore é no nó principal ao qual estão ligados os vários ramos, que é feito o controlo da rede e do fluxo de tráfego, tornando-se numa arquitectura de fácil controlo pois este nó fornece monitorização e gestão centralizada. Outra vantagem é que todos ONUs têm o mesmo *power budget*, ou seja, todos vão receber aproximadamente um sinal óptico com a mesma qualidade.

A principal desvantagem desta topologia surge do facto de toda a rede depender de um equipamento central que em caso de falha pode colocar toda a rede em baixo. Podem também ocorrer outro tipo de falhas parciais nos amplificadores, transmissores ou receptores nos nós de acesso bem como na fibra, que conduzem geralmente a falhas em um ou mais ramos da árvore.

## Topologias Híbridas

Uma rede híbrida resulta da combinação de duas ou mais arquitecturas de forma a tirar partido das vantagens de cada uma. Esta combinação de topologias básicas pode oferecer maior granularidade e densidade da rede, bem como maior capacidade de resiliência e optimização na instalação da fibra.

Uma abordagem promissora apresentada na figura 3.3 consiste na utilização de um anel primário associado a uma árvore secundária com o objectivo de duas fibras estarem ligadas ao OLT, para em caso de corte de uma das fibras a outra poder ser usada para a transmissão. A árvore actua como segmento de acesso que permite optimização do comprimento da fibra e fácil escalabilidade.

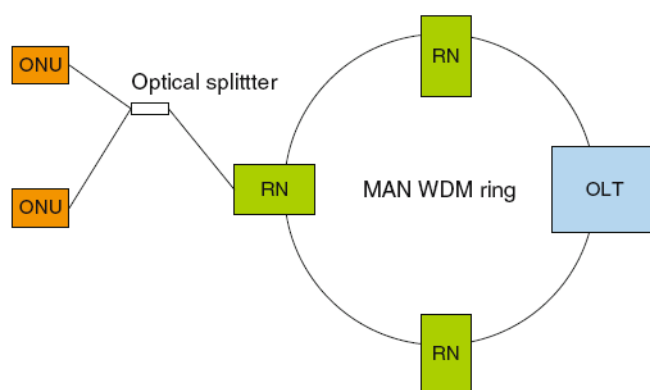


Figura 3.3: Topologia em anel com árvore de acesso [10]

Alguns dos projectos que ilustram este tipo de arquitectura avançada são as redes SUCCESS [11] e SARDANA [12].

A arquitectura da rede SUCCESS baseia-se num anel colector de fibra única onde estão dispostos vários ramos de distribuição em estrela para ligação entre o CO e os utilizadores. A configuração semi-passiva dos nós remotos nesta rede híbrida possibilita protecção e restauro, tornando-a resiliente a falhas de potência e permitindo o suporte quer a clientes empresariais como residenciais na mesma infra-estrutura de acesso. A arquitectura além de fornecer compatibilidade a utilizadores em TDM-PONs, é simultaneamente capaz de proporcionar serviços melhorados de banda larga a novos utilizadores em DWDM-PONs através de técnicas WDM avançadas.

A arquitectura da rede SARDANA consiste também num anel principal e árvores de acesso ligadas por meio de nós remotos. No entanto o anel é constituído por duas fibras onde são transportados sinais WDM (uma fibra transporta sinais DS e a outra os sinais US) que são distribuídos pelas várias árvores de fibra única (duas por RN) servindo utilizadores numa topologia TDM. A existência de um anel permite controlo de tráfego através do caminho mais curto e resiliência em caso de falhas nos componentes, os sinais são redireccionados pelo caminho alternativo. Para além de serem utilizadas várias técnicas de monitorização para supervisão e gestão de falhas é introduzida amplificação remota nos RNs por meio de EDFs para a compensação de perdas por Add/Drop e filtragem [12].

Uma outra abordagem de uma topologia híbrida consiste na utilização de dois anéis que oferecem resiliência em ambos os segmentos, primário (metro) e secundário (acesso), mas que implicam o uso de protocolos de acesso mais complexos e instalação de uma maior quantidade de fibra.

## 3.2. Tecnologia de Transmissão óptica em PONs

Existem várias técnicas de acesso múltiplo que permitem a multiplexagem de canais numa arquitectura PON, especificamente *Time-Division Multiple Access* (TDMA), *Wavelength-Division Multiple Access* (WDMA), *Subcarrier-Division Multiple Access* (SCMA) e *Code-Division Multiple Access* (CDMA). De entre estas técnicas, as mais importantes por serem promissoras na aplicação em sistemas futuros são *Time Division Multiplexing* TDM-PON e *Wavelength Division Multiplexing* WDM-PON. A figura 3.4 mostra quatro abordagens diferentes que proporcionam serviços FTTH.

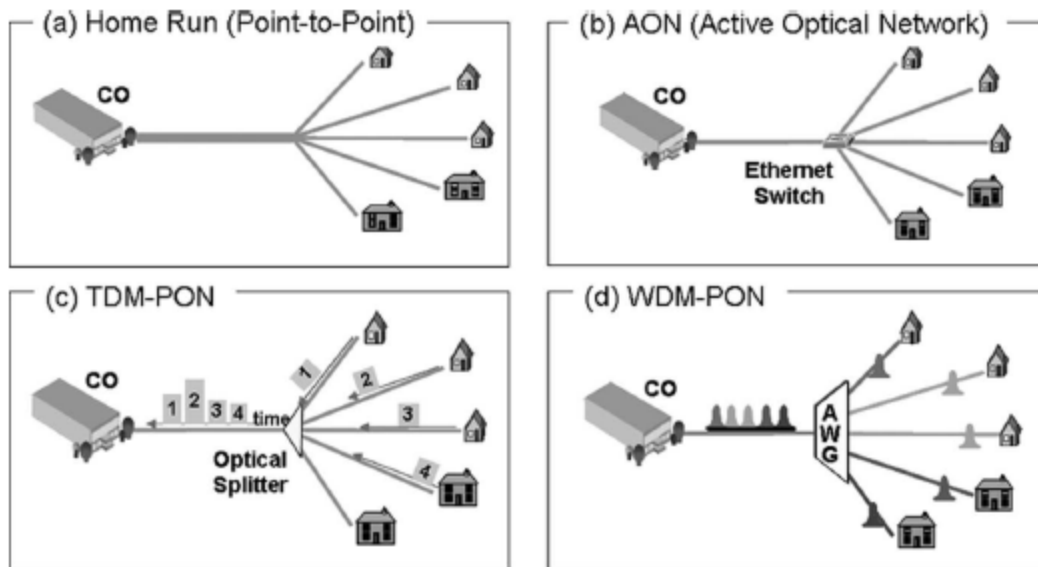


Figura 3.4: Abordagens FTTH. (a) Ligação ponto-a-ponto. (b) Rede óptica com componentes activos. (c) Rede óptica passiva TDM. (d) Rede óptica passiva WDM [1].

### 3.2.1. Time Division Multiplexing

O TDM consiste na multiplexagem de vários sinais no domínio do tempo para transmissão de informação através de um canal único. Blocos de informação de diferentes sinais são intercalados no tempo e enviados para todos os ONTs (broadcast) partilhando um único comprimento de onda. Em cada ONT é feita a selecção das parcelas atribuídas a cada um utilizando endereçamento no início de cada pacote de dados ou por intervalos de tempo predefinidos. Torna-se assim relativamente fácil a atribuição de larguras de banda diferentes a cada utilizador uma vez que o controlo do endereçamento e do comprimento dos pacotes é realizado no OLT. Uma vez que é partilhado um único transmissor e receptor no CO, um único transceiver no OLT e ainda o facto de todos os ONUs serem idênticos por operarem no mesmo comprimento de onda o TDM oferece uma solução rentável que é a preferida para as redes de acesso. No entanto apresenta desvantagens no que diz respeito à segurança, pois cada ONT tem acesso aos dados destinados aos outros utilizadores sendo assim necessária encriptação de dados DS.

Na direcção US, podem ocorrer colisões caso sejam transmitidos simultaneamente fluxos de dados dos diferentes ONUs. Assim, a PON deve utilizar um mecanismo de separação de canais para evitar colisões de dados e partilhar de maneira justa a capacidade



do canal e os recursos. Um método possível é utilizando TDMA. Esta técnica baseia-se na atribuição de intervalos de tempo (time slots) dedicados a cada um dos utilizadores na rede. Cada utilizador pode então usar toda a largura de banda disponível da ligação US no intervalo de tempo alocado [1]. Actualmente existem dois standards fundamentais para o controlo do acesso múltiplo, EPON e GPON.

Uma vez que o atraso de tempo e perdas ópticas são diferentes em cada ONT, é necessário o uso de um receptor óptico em modo rajada no OLT. Deste modo é feito um ajuste rápido da sincronização do relógio e do ganho no receptor para cada pacote de dados dos diferentes utilizadores.

Existem dúvidas sobre se TDM-PONs podem satisfazer as exigências da futura evolução das redes no que respeita à largura de banda e power budget. Além da segurança, um problema do TDM é o facto de aumentarem as perdas de potência com o aumento do número de ONUs. Isto deve-se ao uso de power splitters que impõem perdas por inserção e divisão limitando a distância máxima da ligação.

### **3.2.2. Wavelength Division Multiplexing**

Quando surge a necessidade de aumento da capacidade de transmissão a utilização do TDM apresenta limitações. O WDM é uma técnica de multiplexagem óptica que permite tirar partido da elevada largura de banda oferecida nas fibras ópticas de maneira eficiente. São multiplexados vários portadores ópticos numa única fibra, utilizando diferentes comprimentos de onda de um laser para o transporte de cada sinal. Assim, são necessárias diferentes fontes de laser no OLT para cada utilizador ligado à PON. Uma vez que os vários comprimentos de onda são direccionados por um demultiplexer no RN para cada utilizador, não existem problemas de segurança dado que os outros utilizadores na PON não têm acesso a nenhum dos outros comprimentos de onda DS. As operações de mux/demux são realizadas usando um AWG ou por filtros dieléctricos *thin-film*.

Para os sinais US é utilizado WDMA para a separação de canais, onde cada ONU funciona num comprimento de onda diferente. Um utilizador pode enviar dados sempre que pretender sem causar colisões com os restantes. Cada utilizador possui um canal dedicado ponto-a-ponto para o OLT, partilhando uma arquitectura física ponto-multiponto

que permite diferentes taxas de transmissão e modulações para os diferentes usuários. Assim, são eliminados quaisquer problemas de gestão relacionados com a partilha da PON.

Embora de um ponto de vista teórico se apresente como uma solução simples, afigura-se proibitivo em termos de custo para uma rede de acesso. Os ONUs deixam de ser idênticos, passando a existir vários tipos de ONUs que diferem no comprimento de onda dos lasers. Assim, nos ONUs devem ser usados lasers com largura espectral estreita que os torna mais caros. É possível utilizar lasers sintonizáveis para que todos os ONUs sejam idênticos, no entanto no estado da tecnologia actual apresentam custos elevados [5].

Os sistemas WDM estão divididos em diferentes padrões de comprimentos de onda: CWDM e DWDM. O DWDM trabalha com espaçamentos de canal tão pequenos como 0.8 ou 0.4 nm, a 1-40 Gbps. A sua aplicação nas redes de acesso é limitada uma vez que é necessário o uso de componentes avançados para alcançar por exemplo estabilidade dos comprimentos de onda das fontes ou elevada precisão na filtragem. O CWDM apresenta-se como uma solução robusta e económica. O espaçamento típico CWDM é de 20 nm e uma vez que não é necessário controlo de temperatura para estabilidade do comprimento de onda das fontes, os transceivers possuem geralmente um custo, tamanho e consumo de energia mais baixos em relação aos seus homólogos WDM/DWDM [3].

Em conclusão, o TDM-PON e WDM-PON possuem vantagens e desvantagens de modo complementar. As vantagens do primeiro são desvantagens do segundo e vice-versa. O WDM possui vantagens em termos de largura de banda, transparência de protocolo, segurança e simplicidade de electrónica, no entanto a largura de banda que está disponível para um comprimento de onda não é totalmente utilizada, daí o TDM-PON ser mais eficiente. Enquanto o TDM-PON parece uma solução aceitável para as actuais exigências de largura de banda, as projecções para taxas de transmissão futuras juntamente com os recentes avanços na tecnologia WDM podem torná-la a solução preferida para redes de acesso futuras.

### **3.2.3. PONs WDM/TDM Híbridas**

A combinação de WDM-PONs com técnicas adicionais TDMA, particularmente as utilizadas pelos standards EPON e GPON, resulta numa arquitectura híbrida WDM/TDM-PON que melhora a escalabilidade da rede permitindo *splitting ratios* até 1:1000 [8]. A

ideia consiste numa mistura de ambos os conceitos de modo a combinar as vantagens de cada solução. A abordagem preferida para uma rede híbrida WDM/TDM consiste em agregar PONs TDM numa PON WDM, que resulta numa rede de elevada densidade capaz de oferecer conectividade a um grande número de utilizadores. No entanto, nesta solução continua a ser necessário o uso de lasers sintonizáveis nos ONUs, caso contrário passam a existir vários tipos de ONUs. Outra abordagem apresentada na figura 3.5 consiste na partilha de uma stack de lasers entre os ONUs ligados à rede. Esta alternativa permite uma redução de custos uma vez que não é necessário alocar um laser no OLT para cada ONU. Cada laser sintonizável comuta para diferentes comprimentos de onda enviando dados TDM para os diferentes ONUs.

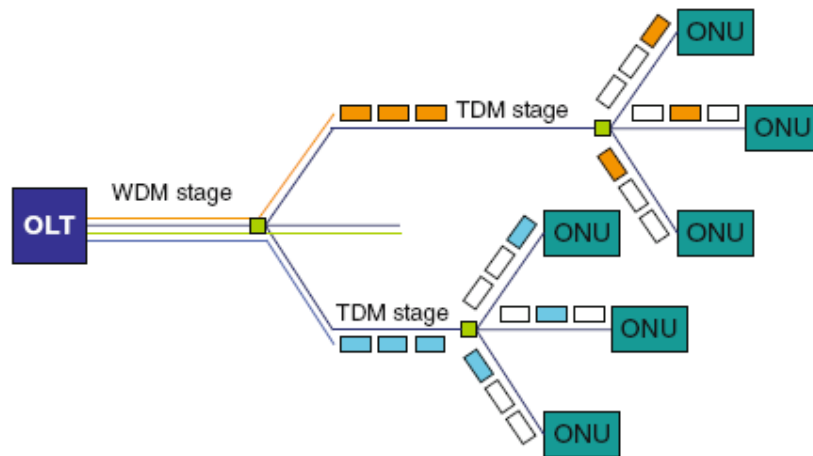


Figura 3.5: Exemplo de topologia híbrida WDM/TDM [3]

## Capítulo 4. Falhas na transmissão óptica

### 4.1. Degradação e falhas na transmissão óptica

À medida que os sinais ópticos atravessam as fibras e os vários componentes de rede, passivos e activos, podem ocorrer falhas nos componentes ou sofrer degradações que afectam a transmissão, nomeadamente nível de intensidade do sinal, assim como propriedades temporais, espectrais e polarização [14].

#### 4.1.1. Falhas de Componentes

As falhas nos componentes podem ter origem em equipamentos incorrectamente instalados ou configurados, deterioração ou avarias e ainda intrusões ou falhas de segurança na rede. Podem surgir também cortes de fibra que comprometem a sobrevivência da rede, e a adição de novos equipamentos, chamados upgrades, poderá tornar-se um dos factores de insuficiência total ou parcial da rede.

Os componentes de Hardware possuem normalmente um microprocessador que dá informação do seu estado ao gestor de rede e que é capaz de realizar ajustes no componente quando solicitado pelo gestor. Esta informação é normalmente entregue no formato binário. De modo a evitar sobrecargas na rede, os dispositivos de controlo/processamento podem deixar de enviar continuamente informação ao gestor, solicitando esta informação quando necessária. São de seguida apresentadas algumas falhas que podem ocorrer nos diferentes equipamentos.

## **Falhas na Fibra Óptica**

As fibras Ópticas são instaladas em canais subterrâneos e é bastante frequente a ocorrência de cortes na fibra devido a escavações, acções decorrentes da actividade agrícola, desastres naturais ou mesmo animais. No que respeita a cabos submarinos, estes são vulneráveis a danos provenientes de âncoras, equipamento de pesca e submarinos. A ocorrência de cortes de fibra pode provocar uma enorme perda de informação bem como uma grande quantidade de alarmes que são enviados por outros equipamentos capazes de detectar a perda do sinal. Algumas causas de perdas nas fibras são as perdas por união entre duas fibras (Splice) e perdas por dobragem (Bending). As fibras ópticas podem também experimentar degradação e alguns efeitos analisados na secção 4.1.2.

## **Falhas nos Transmissores**

Quando a temperatura ou a potência no transmissor ultrapassa um certo limite é enviado um alarme. Para cada uma destas variáveis existem dois intervalos, o primeiro delimita os valores para os quais o transmissor funciona correctamente e ultrapassado um dos limites inferior ou superior de temperatura ou potência, é enviado um alarme informando que a variável está demasiado alta/baixa. Quando é transposto o segundo intervalo é enviado um novo alarme e o transmissor é desligado de modo a prevenir danos que possam ocorrer na rede. Se o valor da temperatura ou potência voltar ao intervalo de funcionamento correcto é enviado um alarme que cancela o primeiro [15].

## **Falhas nos Receptores**

Os parâmetros característicos dos receptores ópticos são a sensibilidade e a sobrecarga (Overload). A sensibilidade define-se como a potência óptica média necessária para alcançar um dado valor de BER (Bit Error Rate) a determinado bit-rate. O parâmetro de sobrecarga informa sobre a mínima potência de entrada que o receptor é capaz de receber.

Assim como nos transmissores, os receptores também conseguem detectar aumento/diminuição da potência de entrada, ou seja, quando é excedido o limiar aceitável, é enviado um alarme ao gestor de rede.

### **Falhas nos Amplificadores Ópticos**

Dependendo do tipo de amplificador e da sua implementação, podem ser enviados vários alarmes. Os principais motivos de alarme surgem quando a potência de entrada no amplificador não é suficiente para o correcto funcionamento ou quando o laser de bomba não funciona devidamente ou está desligado. O amplificador tem assim a capacidade de informar sobre falhas internas e externas.

Uma falha nos lasers de bomba pode dar origem a potências reduzidas em determinadas zonas da linha de transmissão ou em secções internas do amplificador que após amplificação introduz um excesso de ruído. Por outro lado um aumento da potência devido à instabilidade do laser de bomba pode conduzir a efeitos não lineares na transmissão tais como cross-phase (XPM) ou self-phase modulation (SPM) [16].

Os efeitos de XPM num EDFA são normalmente desprezáveis uma vez que é utilizada uma pequena extensão de fibra dopada. No entanto para amplificadores que funcionam na banda L (1570-1610 nm), dado que a área efectiva do núcleo das fibras dopadas usadas nestes amplificadores é relativamente pequena, o parâmetro de não linearidade  $\gamma$  toma um valor superior e são agravados os desvios de fase induzidos por XPM. Assim, XPM pode levar a flutuações de potência num amplificador de banda L [9].

### **Falhas nos filtros Add-Drop**

Estes filtros têm como característica principal a sua banda passante. Com o tempo e condições ambientais esta característica pode sofrer variações devido a degradação. Como consequência a potência óptica de um sinal extraído pode cair para valores abaixo das margens permitidas devido à deslocação do comprimento de onda central do filtro, o que pode provocar alarmes em equipamentos como os receptores ou regeneradores quando não conseguem bloquear o sinal de entrada. Por esta razão, estes filtros fornecem assim

informação sobre a estabilidade dos seus parâmetros, ou seja, a sua frequência central e largura de banda [15].

### Falhas nos Switch's

Ambos os switches eléctricos e ópticos têm a capacidade de enviar alarmes quando apresentam problemas internos como por exemplo a incapacidade de estabelecer uma ligação entre uma entrada e uma saída ou problemas de temperatura.

Alguns dos alarmes anteriormente mencionados são apenas suficientes para detectar falhas permanentes (Hard Failures). Para a detecção de falhas transitórias (Soft Failures) é realizada monitorização de desempenho (Performance Monitoring) em camadas superiores ou por equipamento de monitoria WDM.

A tabela 4.1 fornece as capacidades de alarme mais comuns de componentes ópticos de rede.

Componente Óptico	Capacidade de Monitorização	Possíveis Falhas	Alarme emitido	Descrição do Alarme
Transmissor	Nível de potência e Temperatura por canal à saída	Problema electrónico no laser ou no circuito de monitorização	Alarme de Potência de saída	Alarme activado quando a potência de saída se encontra fora dos limites de operação
		Temperatura ultrapassa a margem devido a avarias electrónicas ou o aumento de corrente causa aumento da temperatura no laser de bomba	Alarme de Temperatura no laser	Alarme activado quando a temperatura se encontra fora dos limites de operação
Receptor	Nível de potência por canal à entrada	Nó upstream a transmitir com potência fora do intervalo ou comprimentos de onda adicionados/removidos sem considerar a sua potência	Alarme de Potência de entrada	Alarme activado quando a potência de entrada se encontra fora dos limites de operação
Add/Drop multiplexer	Nível de potência por comprimento de onda	Nó upstream a transmitir no comprimento de onda com potência fora do intervalo especificado	Alarme de Potência de sinal de canais adicionados, retirados e de passagem	Alarme gerado quando a potência óptica no canal ultrapassa o limite especificado
		Problema no ADM, ataques sofridos para estabelecer caminhos em comprimentos de onda/fibras já usados ou falhas físicas/electrónicas no MUX	Incapacidade de adicionar canais	ADM gera um alarme se for incapaz de adicionar um comprimento de onda solicitado pelo administrador

3Rs (Regenerator/ Reshaper/ Retimer)	Nível de potência de entrada e saída do canal e alarme de temperatura	Nó upstream a transmitir com potência fora do intervalo ou interferência adicionada ao sinal original	Alarme de potência de entrada do canal	Alarme activado quando a potência de entrada se encontra fora dos limites especificados
		Problema electrónico no laser	Alarme de potência de saída do canal	Alarme activado quando a potência de saída se encontra fora dos limites de operação
		Interferência ou <i>Jamming</i> adicionado ao canal ou frames enviados não compatíveis com o sistema 3R	Incapacidade de bloqueio do frame	Alarme enviado quando o dispositivo 3R é incapaz de bloquear o sinal recebido
		Temperatura circundante ultrapassa a margem devido a avarias electrónicas ou aumento de corrente causa aumento da temperatura no laser de bomba	Alarme de temperatura no laser	Alarme activado quando a temperatura se encontra fora dos limites de operação
Switch de Protecção	Nível de potência de entrada	Falha total no laser ou nível do sinal na fibra usada fora dos limites de operação	Comutação da entrada x para a saída y	Alarme activado após detecção de problemas na fibra usada. É efectuada a comutação
Optical Cross Connect (OXC)	Nível de potência de entrada e saída por comprimento de onda	Problemas de coerência no switch ou ataques sofridos para estabelecer caminhos em comprimentos de onda/fibras já usados	Ligação já estabelecida	Alarme enviado se o OXC não for capaz de criar uma ligação por esta já se encontrar estabelecida
		Falha física ou electrónica	Problema de Hardware	Alarme activado se for detectado um problema nos componentes electrónicos ou mecânicos
		Portas bloqueadas	Recursos indisponíveis	Alarme activado se o comprimento de onda destino estiver indisponível
		Encaminhamento Incorrecto	Problema de Hardware, Potência abaixo/acima do limite na porta destino	São emitidos alarmes devido a problemas de hardware, potência abaixo do limite na porta destino e potência acima do limite na porta destino encaminhada incorrectamente
		Nó upstream a transmitir num comprimento de onda com potência superior/inferior a um valor limite	Alarme de Potência de entrada num comprimento de onda superior/inferior ao valor limite	Alarme enviado quando é detectada uma potência de entrada superior/inferior a um limite em qualquer porta e em qualquer comprimento de onda
		Encaminhamento incorrecto ou potência	Alarme de	Alarme enviado quando é



		de entrada para o canal superior/inferior a um valor limite	Potência de saída num comprimento de onda superior/inferior ao valor limite	detectada uma potência de saída superior/inferior a um limite em qualquer porta e em qualquer comprimento de onda
Conversor de comprimento de onda (electrónico)	Potência de entrada e saída por comprimento de onda	Nó upstream a transmitir no comprimento de onda com potência fora do intervalo especificado	Potência de entrada fora do intervalo	Alarme gerado quando é detectada potência fora do limite de operação
		Problema electrónico no laser	Potência de saída fora do intervalo	Alarme gerado quando é detectada potência de saída fora do limite de operação
		Conversão para comprimento de onda errado	Alarme de conversão de comprimento de onda	Problema de conversão é detectado se for medida potência inferior ao limite no comprimento de onda destino e potência superior ao limite noutra comprimento de onda de saída
		Bloqueio de comprimento de onda devido a recursos insuficientes na fibra	Bloqueio de comprimento de onda	O bloqueio é detectado se o comprimento de onda de saída solicitado já estiver em uso na fibra
Conversor de comprimento de onda (óptico)	Nenhuma	Conversão para comprimento de onda errado	Nenhum	---
		Bloqueio de comprimento de onda	Nenhum	---
Amplificador Óptico	Potência agregada de entrada e saída, EDFA e temperatura de bomba	Problema electrónico no laser	Alarme de potência agregada de saída	Alarme activado quando a potência óptica de saída se encontra fora do limite de operação
		Nó upstream a transmitir com potência fora do intervalo ou comprimentos de onda adicionados/removidos sem considerar a sua potência	Alarme de potência agregada de entrada	Alarme activado quando a potência óptica de entrada se encontra fora do limite especificado pelo utilizador

Tabela 4.1: Capacidades de alarme de componentes ópticos [17].

#### **4.1.2. Degradação da qualidade de transmissão na camada física**

Existem ainda diversos efeitos que afectam a transmissão óptica e devem ser minimizados ou controlados. A degradação da camada física pode ser classificada em efeitos lineares e efeitos não lineares. Os primeiros são independentes da potência do sinal e afectam cada canal óptico individualmente, ao passo que os não lineares podem causar também perturbações e interferências entre canais ópticos.

##### **Efeitos lineares**

Destes efeitos destacam-se a dispersão cromática, PMD (Polarization Mode Dispersion), PDL (Polarization Dependent Losses), atenuação da fibra, perdas por inserção de componentes (insertion loss), ruído ASE (Amplified Spontaneous Emission), crosstalk e concatenação de filtros.

A Dispersão Cromática (GVD – Group-Velocity Dispersion) surge devido à diferença de velocidade dos diferentes comprimentos de onda que se propagam na fibra, causa o alargamento dos pulsos ao longo do comprimento da fibra óptica o que leva à distorção do sinal transmitido no receptor. Pode causar então uma redução da energia do pulso dentro do intervalo do bit ou provocar interferência entre símbolos (ISI) devido ao alargamento do pulso para fora do intervalo alocado [14]. Para a compensação óptica da dispersão podem ser usadas redes de Bragg e fibras compensadoras de dispersão (DCF). Apesar de constituir um problema em redes ópticas de elevada taxa de transmissão, a dispersão pode ajudar a reduzir outros efeitos não desejados como XPM e SPM.

Devido a imperfeições no núcleo da fibra resultantes do processo de fabrico e o facto de não ser perfeitamente circular surge a dispersão dos modos de polarização (PMD), onde polarizações diferentes do sinal viajam a diferentes velocidades criando alargamento do pulso. A PMD pode tornar-se um problema para elevadas taxas de transmissão. Normalmente combinada com a PMD surgem as perdas dependentes da polarização (PDL), podem causar variações da potência óptica, distorção de formas de onda e desvanecimento da relação sinal-ruído.

A Atenuação surge à medida que o sinal se propaga num meio de transmissão provocando uma diminuição da potência do sinal. Aumenta geralmente de forma exponencial. A Atenuação apresenta duas componentes, perdas intrínsecas à fibra e perdas

extrínsecas por dobragem, a primeira pode ser adicionalmente subdividida em absorção material (devido à ressonância das moléculas do silício e impurezas na fibra) e Rayleigh Scattering (devido à não uniformidade do meio que causa variações no índice de refração).

O coeficiente de atenuação (constante para um determinado comprimento de onda) é normalmente quantificado em dB/km e é dado pela expressão:

$$\alpha_{(dB/km)} = \frac{10}{L} \log_{10} \left( \frac{P_T}{P_0} \right)$$

onde L é o comprimento da fibra em km,  $P_T$  é a potência transmitida e  $P_0$  a potência de entrada.

Cada componente usado num sistema de transmissão pode introduzir perdas por inserção. Este tipo de perdas depende da estrutura interna de cada componente e deve ser considerado uma vez que pode comprometer o *power budget* do sistema. Como exemplo, a temperatura interna de um componente pode aumentar após algumas horas de funcionamento e afectar negativamente a sua performance.

Os EDFAs (Erbium Doped Fiber Amplifiers) amplificam um sinal por meio de emissão estimulada, além desta existe também emissão espontânea que leva o amplificador a tratar esta radiação como outro sinal de entrada que é amplificado em adição ao sinal incidente, o que resulta em ruído ASE à saída do EDFA.

Existem ainda outras fontes de ruído como o shot noise que ocorre devido à distribuição aleatória de electrões gerados no processo de foto detecção nos fotodetectores e ainda ruído térmico.

O Crosstalk pode ser causado ou por sinais com diferentes comprimentos de onda (inter-canal) ou por sinais no mesmo comprimento de onda numa outra fibra (intra-canal), por exemplo devido a imperfeições no AWG (*Arrayed waveguide grating*). Leva à diminuição da relação sinal-ruído (*SNR – Signal to noise ratio*) conduzindo a um aumento do BER (Bit Error rate).

À medida que são concatenados ao longo da linha de transmissão cada vez mais componentes de filtragem a banda passante efectiva torna-se mais estreita e o sistema fica susceptível a desalinhamentos da banda do filtro devido a imperfeições dos componentes, variações de temperatura e *aging*.

## Efeitos não lineares

Como efeitos não lineares mais importantes, define-se a auto-modulação de fase (*SPM - Self Phase Modulation*), que é do tipo intra-canal, modulação cruzada de fase (*XPM - Cross Phase Modulation*) e mistura de quatro ondas (*FWM - Four Wave Mixing*) que são interferências inter-canal e ainda dispersão de *Brillouin* estimulada (*SBS - Stimulated Brillouin Scattering*) e dispersão de *Raman* estimulada (*SRS - Stimulated Raman Scattering*).

A auto-modulação de fase surge devido a variações na potência do sinal óptico e do coeficiente de refração não linear da fibra. Resulta numa variação de fase no campo eléctrico do sinal que leva ao alargamento dos impulsos ópticos. Estes desvios na fase do sinal provocam uma variação da frequência instantânea em torno da frequência central. No domínio do tempo e para pequenos pulsos estas componentes adicionais geradas pela SPM associadas a efeitos de dispersão material levam também ao alargamento ou compressão do pulso afectando assim o bit rate e o BER.

A modulação cruzada de fase é semelhante à SPM, mas neste caso a fase de um sinal óptico com um dado comprimento de onda é afectada pela presença de outros sinais ópticos propagados com diferentes comprimentos de onda, direcções ou polarizações. A XPM pode conduzir também ao alargamento espectral, mas que pode não ser simétrico e produz consequências no domínio temporal.

A mistura de quatro ondas é um efeito não linear de terceira ordem que tem grande importância em sistemas de comunicação ópticos multicanal (WDM) e ocorre quando existe troca de energia entre canais com diferentes frequências que resulta na possibilidade de geração de novas frequências. A interacção destes canais resulta então no aparecimento de novos sinais ópticos. A fórmula genérica que permite determinar o número total de produtos M de FWM gerados em função do número N de canais é a seguinte:

$$M = \frac{N^2}{2} (N - 1)$$

O efeito indesejado de crosstalk provocado pelos batimentos gerados pelo FWM em sistemas WDM pode ser evitado com a introdução de espaçamentos diferentes entre os canais ou utilizando fibras com um nível de dispersão residual que provoque o desfasamento entre os vários canais.

A dispersão de *Raman* estimulada é um fenómeno não linear que tem origem na interacção da luz do sinal de bomba com vibrações moleculares da sílica. Este sinal bombeado sofre um processo de dispersão e uma parte da luz que é transmitida é desviada para uma frequência inferior. A luz gerada a baixas frequências tem o nome de onda de *Stokes* e a potência que é transferida para a onda cresce rapidamente à medida que a potência do sinal de entrada aumenta. Num sistema com vários comprimentos de onda, os canais com comprimentos de onda mais baixos tendem a perder alguma potência para canais com comprimentos de onda superiores, de modo a colmatar esta perda a potência em cada canal deve ser inferior a um determinado nível. A SRS restringe assim a potência óptica máxima que é possível injectar na fibra, o que limita a transmissão.

A dispersão de *Brillouin* estimulada é semelhante à SRS com a diferença que as alterações na frequência são provocadas por ondas sonoras ao invés de vibrações moleculares e a onda de *Stokes* se propaga apenas na direcção contrária ao sinal de entrada. Este tipo de dispersão pode ocorrer para níveis de potência de entrada inferiores quando comparada com a SRS e a intensidade de luz que sofre dispersão é muito superior. Para contrariar os efeitos da SBS deve-se assegurar um nível de potência abaixo de um limite máximo.

## 4.2. Equipamento de monitorização

As redes ópticas têm vindo a evoluir de arquitecturas opacas e translúcidas para arquitecturas completamente ópticas ou transparentes. Ao contrário das arquitecturas translúcidas nas quais é possível regeneração em zonas de conversão OEO (óptica-eléctrica-óptica), em redes transparentes os componentes eléctricos (switches, multiplexers e regeneradores) que permitem a monitorização da performance, são substituídos por componentes ópticos com capacidades de monitorização reduzida. O elevado custo associado a Optical Performance Monitoring (OPM) tem vindo a decrescer devido a novas tecnologias como filtros sintonizáveis ou espectrómetros [16].

Nas redes ópticas a camada física é constituída por vários tipos de componentes que podem ser passivos ou activos. Os componentes ópticos passivos não apresentam equipamento para monitorização capaz de detectar e reportar alarmes. Por outro lado os

componentes ópticos activos normalmente possuem equipamento para monitorização capaz de detectar e reportar alarmes ao administrador de rede.

As diferentes camadas possuem diferentes capacidades de monitorização. A camada física tem capacidade de detectar falhas permanentes que resultam de uma ruptura total do serviço mas não detecta falhas transitórias resultantes da degradação da qualidade de transmissão.

Existem dois tipos de monitores básicos na camada física que fornecem informação sobre o estado da rede, medidor de potência óptica (Optical Power Meter) e analisador de espectros óptico (Optical Spectrum Analyzer). Ambos os monitores geram alarmes binários quando a potência de entrada ultrapassa uma determinada margem. Um medidor de potência óptica produz um alarme quando a potência agregada na entrada ultrapassa a determinada margem. Pode ser usado com base na fibra (*APM – Aggregate Power Monitor*) ou com base em comprimentos de onda individuais (*WPM – Wavelength Power Monitor*). O analisador de espectros tem a capacidade de monitorizar o nível de potência de cada comprimento de onda activo na fibra, produzindo um alarme para um comprimento de onda específico cuja potência óptica ultrapassa os níveis predefinidos. A tabela 4.2 mostra as características dos alarmes gerados pelo medidor de potência óptica e pelo analisador de espectro óptico.

Dispositivo de Monitorização	Capacidades de Monitorização	Possíveis tipos de falha	Alarme emitido	Descrição do Alarme
Aggregate Optical Power Meter	Nível total de potência óptica na fibra	Um ou mais nós Upstream a transmitir com potência fora do intervalo especificado	Potência óptica agregada fora do intervalo especificado	O Alarme é activado quando a potência óptica agregada se encontra fora do intervalo especificado
Optical Spectrum Analyser	Nível de potência para cada comprimento de onda na fibra	Nó Upstream a transmitir com potência fora do intervalo especificado	Potência do comprimento de onda específico fora do intervalo especificado	O alarme é activado para um comprimento de onda específico quando a potência óptica se encontra fora do intervalo especificado.

Tabela 4.2: Características de alarme de medidor de potência óptica e analisador de espectro óptico [17].

A manutenção óptica é importante no desenvolvimento de uma rede PON de alta qualidade e fiabilidade. As funções de manutenção para uma rede óptica são classificadas pelo ITU-T em duas categorias principais: manutenção preventiva e manutenção pós-falha. Para cada uma são consideradas três actividades apresentadas na tabela 4.3.

Actividade	Categoria	
	Preventiva	Correctiva (pós-falha)
Vigilância	Detecção de degradação de componentes ópticos Detecção de condição crítica	Detecção de alarmes Activação do procedimento de restauro
Teste	Medir e localizar uma degradação detectada	Localizar as falhas Verificar o restauro
Controlo ou reparação	Transferência de fibra para permitir o teste	Transferência de fibra para restabelecer o serviço

Tabela 4.3: Funções e Actividades de Manutenção Óptica (ITU-T).

#### 4.2.1. Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)

O aumento das exigências para entrega de serviços fiáveis em redes FTTH-PON conduz a um agravamento da importância das falhas na fibra. Vários equipamentos como o localizador de falhas e o OTDR baseado numa fonte de comprimento de onda único foram desenvolvidos para a localização (detecção) de falhas na fibra óptica. Um sistema de teste de ligação por fibra óptica usando OTDR é o melhor método disponível para determinar a localização exacta de uma falha num cabo de fibra óptica quando o revestimento do cabo não se encontra visivelmente danificado. Fornece o melhor método para determinar perdas devido a união (splice), conectores ou outras anomalias presentes num dado ponto do sistema e possibilita a melhor representação da integridade global da fibra.

#### Funcionamento

O OTDR é conectado a uma extremidade do sistema óptico e em poucos segundos permite medir as perdas globais na fibra (atenuação) ou perdas em determinada parte do

sistema (conectores, *splice*), dispersão cromática, o comprimento total da fibra e a distância entre vários pontos de interesse.

À medida que a luz se propaga na fibra, uma pequena parte é perdida devido a *Rayleigh scattering*. Como a luz é difundida em todas as direções, uma porção é reflectida para trás ao longo da fibra em direcção à fonte (OTDR) e é utilizada para fins de medição. A esta luz retornada é chamado *backscatter*. O OTDR pode medir continuamente o nível de potência devolvida e assim deduzir as perdas encontradas na fibra. Anomalias como fendas, conectores, união entre fibras, curvaturas, entre outras, têm o efeito de reduzir a potência transmitida na fibra e provocam conseqüentemente uma alteração da potência que é reflectida para o OTDR [18].

Para a determinação do comprimento da fibra o OTDR funciona de modo semelhante ao de um radar. Envia um pulso de luz e “escuta” os ecos provenientes da fibra. Conhecida a velocidade da luz, basta medir o tempo que esta demora a viajar ao longo da fibra para calcular a distância percorrida. O OTDR apresenta os resultados graficamente e mostra a distância entre os vários eventos que ocorrem na fibra. A figura 4.1 mostra um traço característico de um OTDR.

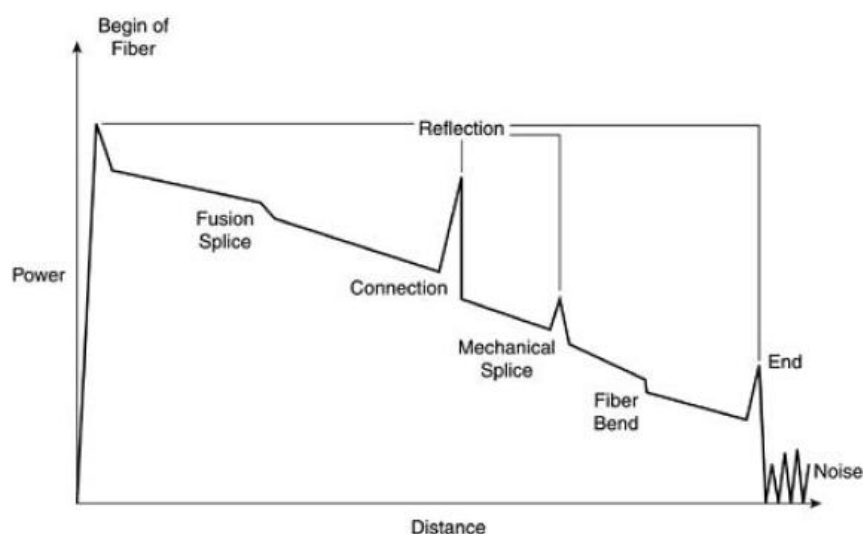


Figura 4.1: Traço característico de um OTDR [19].

O eixo vertical representa a potência e o eixo horizontal a distância. Da figura é possível verificar que devido à atenuação a potência do sinal vai diminuindo com a distância. Observam-se picos que ocorrem devido a eventos reflectivos e quedas de potência que ocorrem devido a eventos não reflectivos. Os conectores e uniões mecânicas entre fibras causam atenuação e reflectividade contrariamente às uniões por fusão e



curvaturas na fibra onde apenas é detectada atenuação. Uma quebra na fibra apresenta uma baixa reflectividade o que leva o sinal do OTDR para níveis de ruído.

Sempre que ocorre uma falha na linha, um técnico liga manualmente um OTDR ao cabo onde é detectada a falha de modo a descobrir a sua localização. Se for possível desconectar da rede o ramo danificado da PON, o OTDR pode ser ligado para localizar a falha e verificar a integridade do ramo após a reparação. Caso contrário o OTDR é inserido na extremidade onde se encontra o ONU. Uma vez que o ramo afectado nem sempre fica completamente inutilizado, é necessário evitar que a restante parte da PON seja afectada pelo sinal de teste. Além disso o sinal OTDR pode sofrer degradação devido à elevada potência do tráfego da linha comparativamente ao sinal de medida do OTDR. A solução consiste em reservar um comprimento de onda para manutenção diferente dos utilizados no sistema de transmissão. Assim, foram desenvolvidos OTDR para detecção de problemas na PON durante o serviço (*in-service*). Como característica apresentam uma porta dedicada para testes a 1625/1650 nm e um filtro que rejeita os sinais não desejados (1310 nm, 1490 nm e 1550 nm) que podem contaminar a medição. Este tipo de localização de falhas na fibra óptica deve ser executado de forma a não interferir com o funcionamento normal e desempenho desejado dos canais de informação [20].

## 4.3 Principais Cenários

### 4.3.1. Rede em anel WDM

A topologia de rede em anel suportada pela tecnologia de transmissão WDM é a principal escolha em comunicações locais ou metropolitanas pois oferece capacidade de resiliência (existem dois caminhos distintos entre OLT-ONU) em caso de uma falha na fibra ou no nó com um número mínimo de ligações, o que permite reduzir os custos quando comparada por exemplo com topologias do tipo malha. O WDM permite não só uma elevada largura de banda mas também vantagens no que respeita à escalabilidade e gestão da rede. Diferentes propostas de anéis WDM em comunicações metropolitanas são analisadas em [21]. Uma arquitectura em anel WDM é composta por N nós conectados por

uma ou mais fibras formando um anel. Em cada ligação são multiplexados vários comprimentos de onda que são extraídos/adicionados em cada nó, que pode ser de natureza passiva (Nó Remoto) ou activa (ONU).

#### 4.3.2. Rede em árvore TDM-PON

Uma topologia de rede em árvore combinada com a tecnologia de transmissão TDM é proposta como a solução de melhor custo-eficiência para redes ponto-multiponto implementadas em infra-estruturas PON permitindo serviços FTTP [1]. O TDM oferece um custo reduzido por utilizador uma vez que é partilhado um único canal por vários utilizadores. São atribuídos diferentes intervalos de tempo a cada utilizador para a transmissão de modo a que cada um possa aproveitar toda a largura de banda da ligação US durante o intervalo alocado. De modo a conectar os utilizadores a uma fibra única é usado um *power splitter* óptico que combina as potências dos utilizadores para a transmissão de volta ao OLT. É importante que cada transmissor no ONT se desligue completamente após o intervalo alocado de modo a evitar interferências com os sinais de dados US de outros ONTs. Uma falha no ONT pode causar transmissão fora do intervalo especificado o que poderá conduzir à suspensão de toda a rede PON.

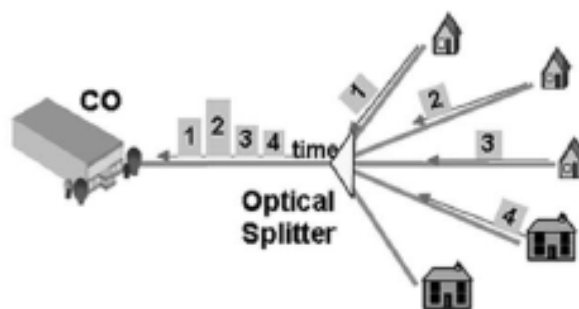


Figura 4.2: Exemplo de rede em árvore TDM-PON [1]

#### 4.3.3. Rede híbrida em anel WDM com árvore TDM

A combinação dos conceitos anel WDM e árvore TDM permite retirar as vantagens de ambas as topologias. Resulta numa rede *metro-access* composta por componentes passivos e com conversão O/E/O apenas no CO e no ONU.

Além de protecção o anel WDM permite reduzir o custo e congestionamento de fibras no CO e a inclusão de mais utilizadores sem redução de largura de banda adicionando novos canais com diferentes comprimentos de onda, no entanto o custo de componentes WDM é relativamente elevado. A árvore TDM oferece um baixo custo por utilizador uma vez que é partilhado um único comprimento de onda por vários utilizadores, contudo, é inevitavelmente sacrificada largura de banda por utilizador. Por este motivo, cada árvore está tipicamente limitada a aproximadamente 32 utilizadores. A combinação das topologias anel e árvore oferece ainda optimização do comprimento da fibra no segmento TDM, granularidade e escalabilidade de modo a aumentar o número de utilizadores mantendo uma largura de banda relativamente elevada.

A rede híbrida é composta por N nós conectados por uma ou mais fibras formando um anel, onde em cada ligação são multiplexados vários comprimentos de onda e em cada nó, de natureza passiva, são distribuídos pelas várias árvores de acesso por meio de OADMs. Em cada nó é introduzida amplificação remota por meio de EDFAs de modo a compensar perdas de adição/subtracção de comprimentos de onda. A amplificação remota é efectuada por meio de lasers de bomba localizados no CO. Na árvore TDM a propagação na fibra única é bidireccional, onde vários comprimentos de onda podem ser transmitidos, permitindo assim a partilha da instalação por vários operadores de rede.

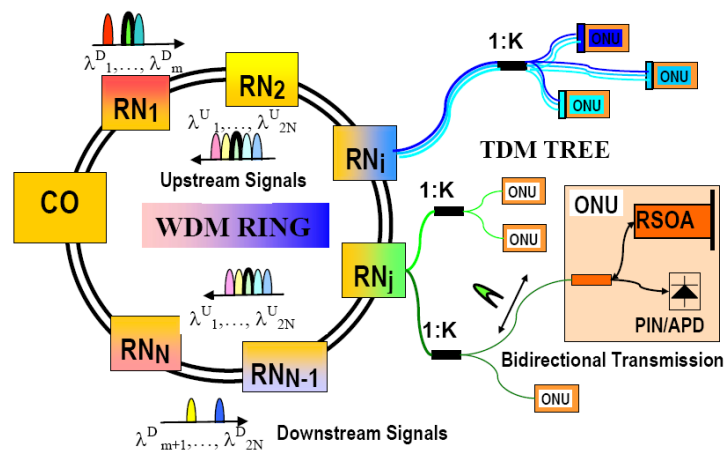


Figura 4.3: Exemplo de uma rede híbrida WDM/TDM [12]

No CO encontra-se também o OLT que é responsável pela monitorização e regulação das actividades na rede, envio dos sinais WDM DS e recepção dos sinais WDM US oriundos dos ONUs.

Em cada dispositivo ou componente da rede podem ocorrer problemas que afectam a sua performance. A tabela seguinte descreve os mais importantes.

<b>Subsistema</b>	<b>Tipo de Degradação causada</b>
CO	Insertion loss do Acoplador WDM
	Efeito Raman devido à instabilidade da potência de bomba induz a intensidade de ruído relativa (RIN)
	Oscilações devido ao double backscattering provocam fonte de ruído
OLT	Instabilidade do comprimento de onda emitido provoca perdas nos filtros e MUX, causa interferência inter-canal
	Instabilidade da potência emitida causa alocações diferentes para os vários comprimentos de onda do sinal WDM
	Insertion loss e instabilidade dos comprimentos de onda centrais dos WDM MUX/DEMUX
	Pré-amplificação no receptor introduz ASE e degrada a qualidade do sinal (Noise Figure)
RN	Insertion loss do Acoplador WDM e Add/Drop
	Instabilidade do comprimento de onda central no Add/Drop (Ex. variação temperatura)
	ASE e falhas de potência no amplificador devido ao modo <i>burst</i>
	Reflexões causadas pela interferência dos sinais US e DS nas árvores de acesso
ONU	Insertion losses do subsistema
	Pré-amplificação no receptor introduz ASE e degrada a qualidade do sinal (Noise Figure)
	Ruído no receptor
Fibra	Corte na Fibra
	Atenuação
	Dispersão Cromática
	Efeitos não lineares que resultam de potência elevada e interacção entre a bomba e o sinal no anel

Tabela 4.4: Degradação de performance nos componentes.

## Capítulo 5. Informação para localização de falhas

Nas redes de comunicação ópticas, e redes em geral, é necessária a existência de um sistema de gestão de falhas capaz de realizar um diagnóstico dos problemas da rede, ou seja, identificar as falhas que ocorrem com base na informação dada pelos vários componentes.

Uma possível falha na rede pode ser detectada quando são emitidos alarmes ou através de mensagens PLOAM e monitorização de performance. Da análise desta informação é possível identificar o tipo de falha que ocorreu, ou seja, se estamos perante uma degradação da qualidade dos sinais da rede ou de uma falha de serviço. Muitas vezes os alarmes fornecem informação que permite a localização da falha, no entanto falhas como cortes de fibra, *splitter* danificado ou degradação do sinal podem ser localizadas usando métodos baseados em OTDR [20]. Depois de localizado o problema é de extrema importância uma reconfiguração da rede de modo a minimizar o impacto causado e a posterior substituição do componente em falha. A figura 5.1 representa o diagrama geral de um sistema para detecção de falhas.

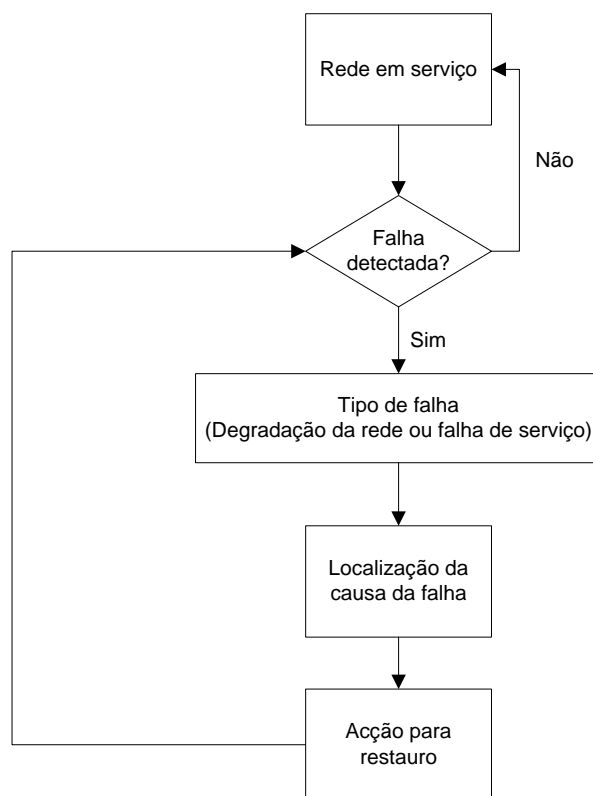


Figura 5.1: Sistema de detecção de falhas

## 5.1. Identificação de falha

Como referido anteriormente podem ocorrer dois tipos fundamentais de falha, degradação na rede quando a qualidade do sinal é afectada por determinado fenómeno ou equipamento e falha de serviço quando um ou mais utilizadores perdem total conectividade com a rede. Consoante o alarme produzido é possível a identificação do tipo de falha.

### Falha de serviço

Para a detecção de falha de serviço existem vários alarmes referidos no capítulo 2 que fornecem esta informação. O alarme LOSi é emitido quando não é recebido no OLT um sinal válido esperado do ONU durante 4 alocações consecutivas, não contíguas a esse ONU. No entanto se não for recebida nenhuma transmissão US no OLT é declarado o alarme LOS que indica uma falha total da PON. Uma falha no transmissor do OLT por exemplo devido a um aumento de corrente no circuito do laser origina o alarme TF. No

caso de falha do transmissor do ONU o mesmo alarme é produzido, no entanto, não é possível a comunicação deste alarme para o OLT, sendo, por essa razão, necessários outros métodos para a sua detecção. Os alarmes LOAi e LOAMi permitem também a detecção de uma falha na conectividade entre OLT e ONU, o primeiro ocorre quando não é recebido um ACK esperado e o segundo quando não são recebidas 3 mensagens PLOAM do ONUi.

A mensagem PLOAM PEE pode ser utilizada para a detecção de erros nos equipamentos OLT/ONU, ou seja, se um ONU não conseguir enviar células ou frames das camadas ATM/GEM para a camada TC informa o OLT e é emitido um alarme PEE neste último. É gerada uma notificação de perda da camada física.

A mensagem PLOAM de verificação de conectividade, PST, é enviada US e DS periodicamente e também após ser detectada uma falha. É aplicável especialmente em configurações PON com sobrevivência como o exemplo da rede SARDANA [12], uma vez que permite accionar mecanismos de APS. O alarme MIS é emitido no OLT ou no ONU quando a PST recebida difere da transmitida.

Alguns componentes de rede analisados no capítulo 4 possuem capacidades de monitorização, nomeadamente dos níveis de potência de entrada no receptor, potência de saída no transmissor e temperatura. Nos amplificadores ópticos, os principais motivos de alarme surgem quando ocorre um problema electrónico no laser que produz alterações dos níveis de potência de saída. São emitidos alarmes posteriormente detectados no OLT e que fornecem informação para a detecção de falha.

### **Degradação na rede**

Existem vários métodos para a detecção de degradação na rede, nomeadamente monitorização da qualidade do sinal na camada física (*Optical Performance Monitoring*). Parâmetros como a potência total ou por canal, comprimento de onda, OSNR, dispersão cromática, PMD, *bit rate*, *jitter* e BER podem ser medidos através de um monitor de canal (OCM). Os diferentes parâmetros OPM normalmente requerem diferentes monitores que podem exigir tecnologia dispendiosa [16].

Na especificação G.984.3 encontram-se definidos vários alarmes que podem ser utilizados para a detecção de problemas na rede relacionados com degradação do sinal. O alarme LOFi é emitido no OLT quando são recebidos 4 delimitadores inválidos sucessivos

do ONU<sub>i</sub> no campo PLO<sub>u</sub>. No caso de serem detectados HECs (*Header Error Control*) do ONU<sub>i</sub> inválidos no canal ATM ou se um canal GEM não for estabelecido são declarados no OLT os alarmes LCDA<sub>i</sub> e LCDG<sub>i</sub> respectivamente.

Quando a transmissão do OLT é recebida com defeitos no ONU<sub>i</sub>, o bit de estado RDI é activado no campo *Ind* do bloco PLO<sub>u</sub> que provoca o alarme RDI<sub>i</sub> no OLT. Os defeitos abrangem falhas gerais do caminho de transmissão DS, incluindo erros de bit excessivos (após realização de FEC), ou *overheads* adulterados.

A monitorização do BER é realizada através da contagem do número de erros de paridade BIP no OLT e ONU, o valor recebido é comparado com o calculado e em caso de diferença é incrementado um contador ERR. Para determinação do número de erros na direcção DS é indicado um intervalo de tempo ao ONU (na mensagem PLOAM *Ber Interval*) para contagem. Após a detecção dos erros BIP, o ONU envia esta informação para o OLT através da mensagem REI. Os alarmes SFi e SDi são emitidos quando ultrapassados os valores predefinidos para o BER. O valor limite pode ser configurável, no entanto para a condição SDi este valor será obrigatoriamente inferior.

## 5.2. Aplicação em cenários

Considerando um cenário idêntico ao referido em 4.3.3 onde é combinado um anel WDM e várias árvores TDM resultando numa rede híbrida *metro-access*, a informação anteriormente descrita pode ser utilizada para a identificação de falhas. No exemplo considerado, o anel é constituído por duas fibras que interligam os RNs, onde uma transporta os sinais DS e a outra os sinais US. Cada secção do anel é composta pelas duas fibras.



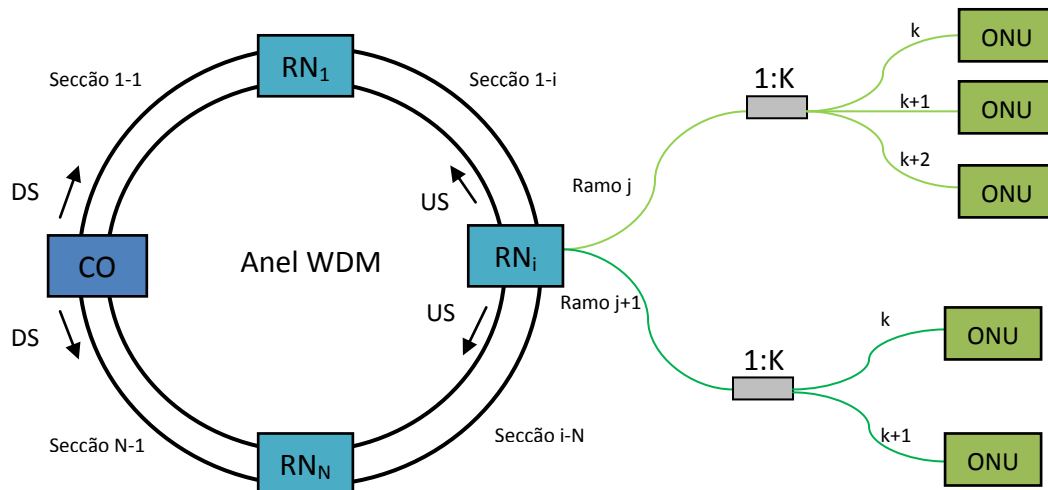


Figura 5.2: Rede híbrida em anel WDM com árvores TDM.

### Problemas no CO e OLT

No CO encontra-se o OLT e todo o equipamento relacionado com emissão da luz bem como monitorização e regulação de todas as actividades da rede. Uma falha neste componente pode afectar toda a rede PON, assim, é importante o controlo do estado dos vários elementos através da monitorização de vários parâmetros como potência de bomba, potência emitida, comprimento de onda, temperatura e ruído. Da camada GTC obtém-se informação de falha no transmissor e ainda falhas relacionadas com a interligação entre camadas. Se não for recebida nenhuma transmissão US um problema no receptor pode ser detectado quando emitido o alarme LOS, no entanto, esta notificação pode significar também uma falha simultânea das secções 1-1 e N-1 da figura 5.2.

### Problemas nas árvores de acesso e ONUs

Da mesma forma que no OLT, também nos ONUs são declarados alarmes que são transmitidos para o OLT. No entanto se o problema for relacionado com a transmissão, ou seja, se não for possível enviar informação do ONU para o OLT é necessário outro método para a localização da falha. Assim, no OLT pode ser realizada uma análise dos alarmes de perda de sinal LOS<sub>i</sub> emitidos, que permitem saber a localização do problema.

Considerando o cenário da figura 5.3, a detecção de apenas um alarme LOS<sub>i</sub> no OLT informa sobre uma falha no ONU<sub>i</sub> ou no ramo (k) que liga este ONU ao *splitter*. Se ocorrerem alarmes para todos os ONUs ligados a um determinado *splitter*, então o problema poderá ser no *splitter* ou no ramo (j) que liga o *splitter* ao RN.

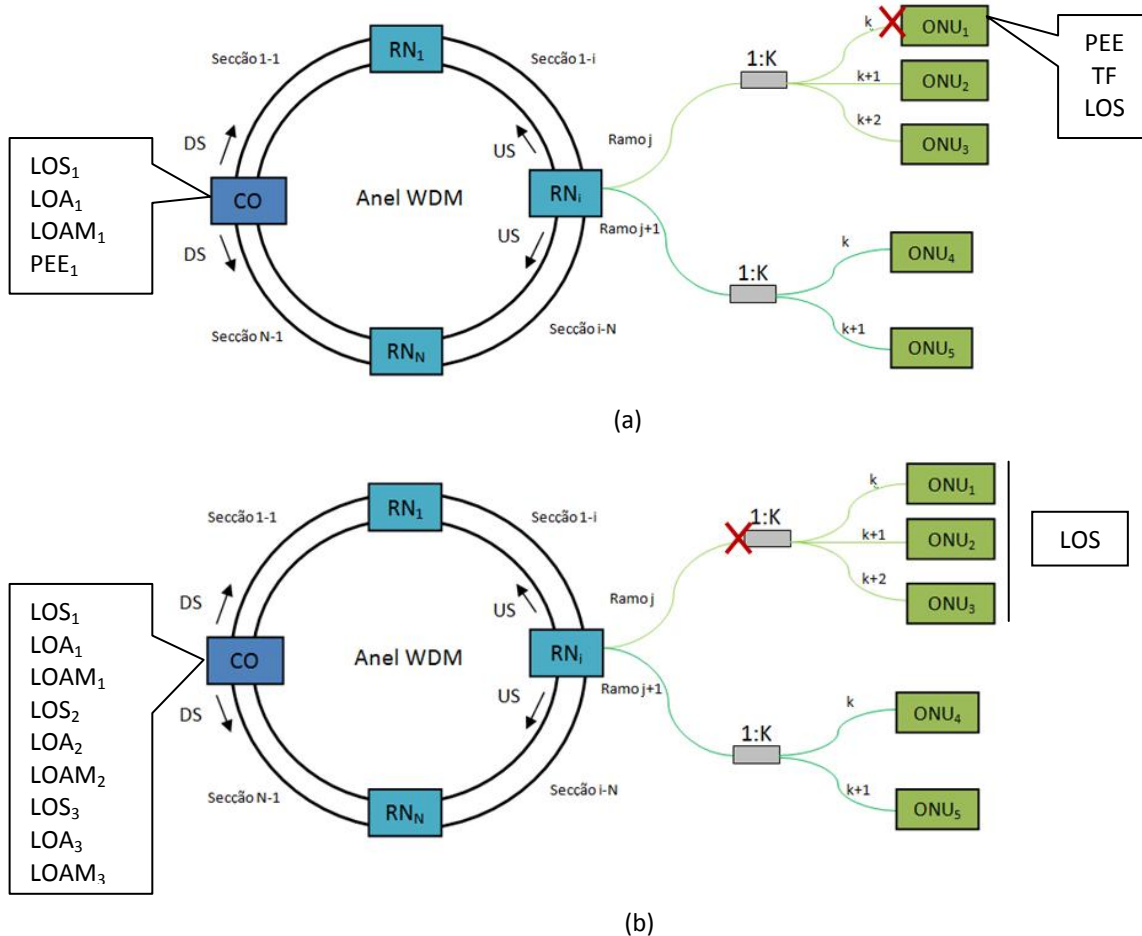


Figura 5.3: Alarmes importantes emitidos. (a) Problema no ONU<sub>1</sub> ou ramo k. (b) Problema no splitter ou ramo j.

### Problemas no Anel e RNs

Para a detecção de irregularidades nas secções que ligam os vários nós, são analisados os alarmes de perda de sinal no OLT. Uma secção é declarada em falha se forem verificados alarmes relativos a todos os ONUs cuja transmissão é efectuada por essa secção. No cenário da figura 5.4 e considerando que as transmissões do RN<sub>1</sub> são efectuadas pela secção 1-1 e do RN<sub>i</sub> pela secção 1-i, uma falha na primeira pode ser detectada se emitidos alarmes no OLT relativos a todos os ONUs ligados a RN<sub>1</sub> e RN<sub>i</sub>. Uma falha em 1-i é detectada se verificados apenas alarmes relativos a ONUs ligados ao RN<sub>i</sub>.

De modo a permitir o restauro do funcionamento da rede quando ocorrem defeitos nas secções do anel, é realizada a comutação de caminho nos nós afectados. Esta

modificação do caminho de transmissão designada APS é realizada após a detecção de falhas de conectividade na ligação quando os valores de controlo na mensagem PST diferem. Se após executada a comutação de caminho o problema não for resolvido, isto é, os mesmos alarmes são accionados, então o problema encontra-se no RN ou na árvore.

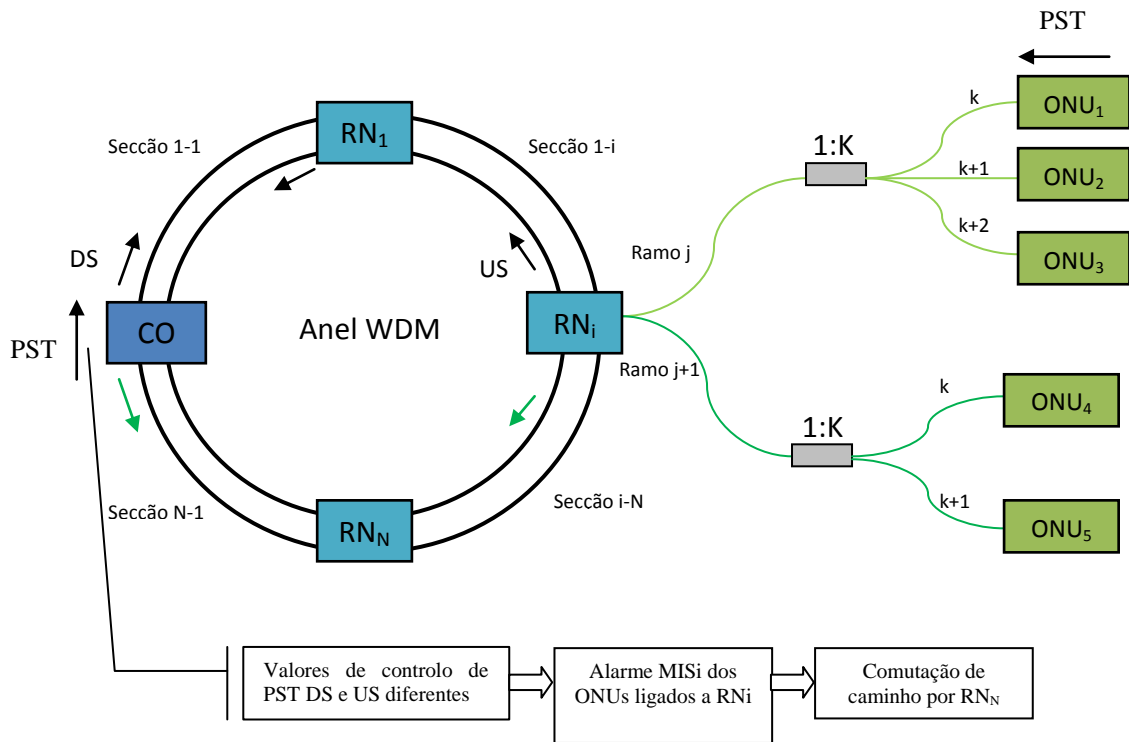


Figura 5.4: Comutação de caminho para restauro do funcionamento da rede.

Na tabela 5.1 são resumidos os métodos e alarmes apresentados anteriormente que permitem a detecção de uma falha em determinado componente de rede.

<b>Localização da falha</b>	<b>Método de detecção</b>
CO/OLT	- Monitorização de potência emitida, potência de bomba, comprimento de onda, temperatura e ruído. - Alarmes TF, LOS, PEE.
ONU	- Alarmes PEEi, TF, LOSi, LOAi, LOAMi.
Ramo k da árvore	- Alarmes LOSi, LOAi, LOAMi.
Splitter ou ramo j da árvore	- Alarmes LOSi, LOAi, LOAMi para todos os ONUs ligados ao splitter.
Secção do Anel	- Alarmes LOSi, LOAi, LOAMi relativos a todos os ONUs cuja transmissão é efectuada por essa secção.
RN	- Alarmes LOSi, LOAi, LOAMi de todos os ONUs conectados ao RN após comutação do caminho nesse nó.

Tabela 5.1: Alarmes para detecção de falhas em determinado componente.

Na figura 5.5 é apresentado um diagrama que resume o processo de detecção e localização de uma falha nas várias partes que constituem da rede. Para a localização de degradação numa zona da rede, é realizada uma análise das notificações RDi, SDi e SFi de modo semelhante à efectuada para uma falha de serviço com os alarmes LOSi. Após a identificação da secção, ramo ou componente deteriorado são gerados relatórios de falha.

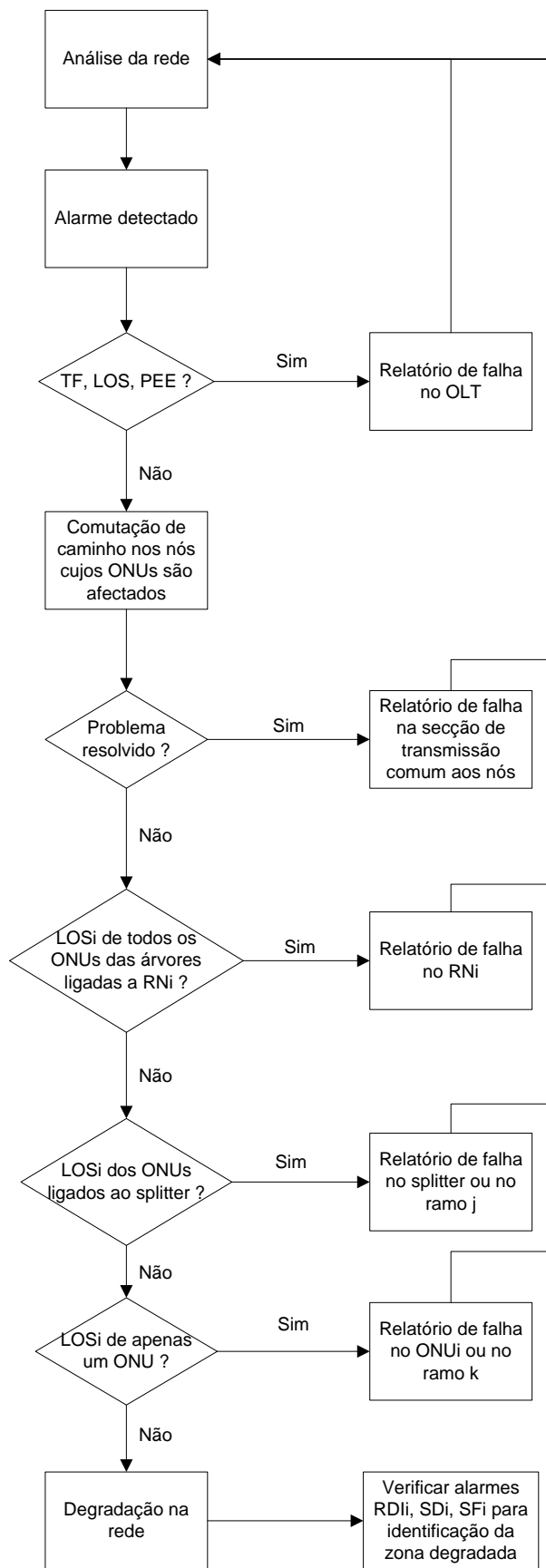


Figura 5.5: Método de localização de uma falha numa rede híbrida.

## Capítulo 6. Conclusões e Trabalho Futuro

### 6.1. Conclusões

Este trabalho encontra-se estruturado em 6 capítulos, englobando diversas áreas, como standards de transmissão dos quais foi analisada com maior ênfase a camada TC do GPON, arquitecturas de rede, técnicas de multiplexagem, falhas na transmissão óptica provocadas por componentes ou por efeitos na fibra e métodos para a detecção e localização de problemas em redes ópticas passivas.

No segundo capítulo foi apresentado um estudo dos standards de transmissão, as suas características, estrutura dos frames, protocolos utilizados e foram ainda identificados para o GPON parâmetros como mensagens PLOAM e alarmes que permitem obter informações no OLT sobre determinadas falhas que ocorrem na rede.

No terceiro capítulo foram analisadas várias arquitecturas de rede FTTH ponto-a-ponto e ponto-multiponto e as tecnologias TDM e WDM, verificou-se que uma arquitectura híbrida permite retirar vantagens de duas ou mais arquitecturas de modo a oferecer maior densidade, capacidade de resiliência e optimização na instalação da fibra.

O quarto capítulo contém uma compilação de falhas que podem ocorrer nos vários componentes de uma rede óptica principalmente relacionadas com níveis de potência e temperatura. Foram identificadas as capacidades de monitorização destes componentes e também apresentados alguns efeitos de degradação na camada física que afectam a transmissão óptica. Foram também estudados alguns equipamentos de monitorização, particularmente o OTDR, que informam sobre o estado da rede e permitem uma

representação da integridade global da fibra. Os principais cenários de aplicação de redes PON são brevemente descritos, concluindo que uma combinação dos conceitos anel WDM e árvore TDM permite retirar as vantagens destas duas topologias. O anel WDM fornece resiliência em caso de falha, escalabilidade e permite reduzir custos e congestionamento de fibras no CO. A árvore TDM oferece um baixo custo por utilizador uma vez que é partilhado um comprimento de onda por vários utilizadores.

No quinto capítulo foi apresentada uma análise da informação que pode ser utilizada num sistema de detecção de falhas, nomeadamente alarmes e mensagens PLOAM que permitem a identificação de uma falha de serviço quando um ONU perde total conectividade com o OLT. A detecção de uma deterioração na rede é possível através da troca de mensagens para monitorização do BER entre OLT e ONU, excedidos os valores limite são emitidos alarmes relativos a determinados ONUs. Por último, é aplicada esta informação para a detecção e localização de uma falha numa determinada secção ou componente de numa rede híbrida formada por um anel WDM onde estão ligadas aos nós várias árvores TDM.

## 6.2. Trabalho Futuro

Neste trabalho foi apresentada uma estratégia para a monitoria e protecção em redes ópticas passivas usando informação das camadas física e convergência. No entanto, algum trabalho futuro pode ainda ser desenvolvido de modo a alcançar métodos que permitam uma detecção, localização e restauro de falhas mais eficiente. Apresentam-se algumas ideias que podem ser exploradas partindo dos desenvolvimentos que foram efectuados neste trabalho:

- Desenvolvimento e teste de um algoritmo que permita simular as estratégias identificadas.
- Análise da informação para aplicação num sistema com múltiplas falhas.
- Aplicação dos métodos estudados a outras topologias e cenários reais.
- Estudo de métodos baseados em OTDR que permitem a detecção de problemas na rede durante o serviço.

## Referências

- [1] Chang-Hee Lee, “*Fiber to the home using a PON infrastructure*”, Journal of Lightwave Technology, vol. 24, n° 12, Dezembro 2006.
- [2] K. M. Sivalingam, S. Subramaniam, “*Emerging Optical Network Technologies: Architectures, Protocols and Performance*”, Maio 2004
- [3] “*Asynchronous Transfer Mode (ATM) Passive Optical Networks (PONs)*”, International Engineering Consortium, 2007, [Online], [www.iec.org](http://www.iec.org)
- [4] ITU-T Recs. G.983.1–G.983.10, SG 15, “Broadband Passive Optical Network.”
- [5] G. Kramer, “*Ethernet Passive Optical Networks*”, 2005.
- [6] ITU-T Recs. G.984.1–G.984.4, “*Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON)*”.
- [7] A. Cauvin, J. Brannan, K. Saito, “*Common Technical Specification of the G-PON System among Major Worldwide Access Carriers*”, *IEEE Communications Magazine*, Outubro 2006.
- [8] S. V. Kartalopoulos, “*Next Generation Intelligent Optical Networks*”, Springer, 2008.
- [9] G.P. Agrawal, “*Fiber-Optic Communication Systems*”, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [10] Josep Prat, “*Next-Generation FTTH Passive Optical Networks*”, Springer, 2008.
- [11] F.-T. An, “*SUCCESS: A Next-Generation Hybrid WDM/TDM Optical Access Network Architecture*”, Journal of Lightwave Technology, vol. 22, n° 11, Novembro 2004.
- [12] J. A. Lázaro, “*Remotely amplified SARDANA: Single fiber tree advanced ring based dense access network architecture*”, ECOC 2006, Setembro 2006.



- [13] K. Grobe, “*PON in Adolescence: From TDMA to WDM-PON*”, IEEE Communications Magazine, Janeiro 2008.
- [14] S. Azodolmolky, “*A Survey on Physical Layer Impairments Aware Routing and Wavelength Assignment Algorithms in Optical Networks*”, Computer Networks, Vol. 53, 2009.
- [15] C. Machuca, “*Fault Location Algorithms for Optical Networks*” Tese de doutoramento, EPFL, 2000.
- [16] D. C. Kilper, “*Optical Performance Monitoring*”, Journal of Lightwave Technology, vol. 22, no. 1, Janeiro 2004.
- [17] S. Stanic, “*On Monitoring Transparent Optical Networks*”, ICPPW, 2002.
- [18] J. Crisp, B. Elliott, “*Introduction to Fiber Optics*”, 3<sup>rd</sup> Ed., Elsevier, 2005.
- [19] A. Gumaste, T. Antony, “*DWDM Network Designs and Engineering Solutions*”, Cisco Press, Dezembro 2002.
- [20] M. S. Ab-Rahman “*The Overview of Fiber Fault Localization Technology in TDM-PON Network*”, International Conference on Electronic Design, 2008.
- [21] M. Herzog, “*Metropolitan Area Packet-Switched WDM Networks: A Survey on Ring Systems*”, IEEE Commun. Surv., 2nd. Quarter 2004, vol. 6, no. 2, pp. 2-20, 2004.