

Sistemas de Transmissão

- Sistemas de longa distância
 - Sistemas por fibra ótica
 - Sistemas por feixe hertziano
 - Sistemas por satélite
- **Multiplexagem por divisão de comprimento de onda
(WDM – *Wavelength Division Multiplexing*)**

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Princípios básicos

Elementos de rede

Topologias de rede

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

A **multiplexagem por divisão de comprimento de onda WDM – Wavelength Division Multiplexing** introduziu uma nova dimensão na transmissão em fibras ópticas, que permite **aumentar a capacidade** de uma única fibra de um fator da **ordem das dezenas ou mesmo das centenas**.

Começaremos por apresentar os **princípios** em que se baseia esta tecnologia, seguindo-se a identificação dos **blocos funcionais típicos** que podem ser interligados entre si de forma a constituir as **topologias de referência** e, de um modo geral, redes de qualquer dimensão.

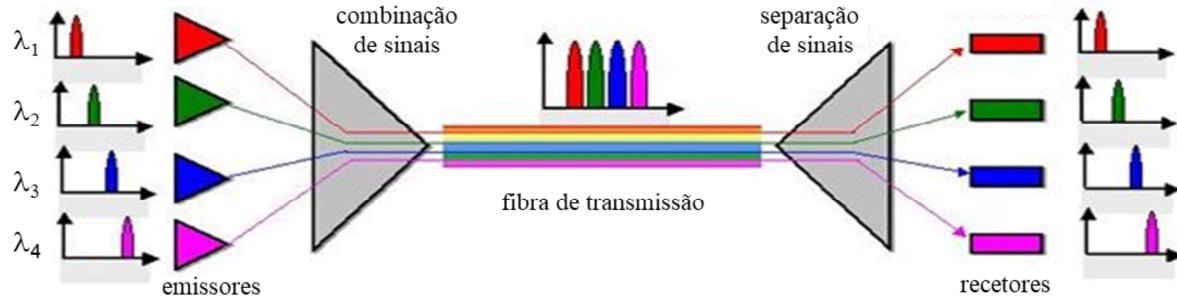
Esta abordagem é muito semelhante à que foi adotada para o estudo das redes SDH, sendo os tipos de elementos de rede e as topologias de WDM equiparáveis às consideradas em SDH, com designações muito semelhantes.

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Princípios básicos

Características gerais dos sistemas de **multiplexagem de comprimento de onda**

- **emissores** produzem luz com **diferentes comprimentos de onda**
- sinais ópticos são combinados e transmitidos numa **fibra monomodo**
- na receção os **sinais são separados (filtrados)** e entregues a receptores



Multiplexagem de sinais ópticos na mesma fibra (exemplo com 4 comprimentos de onda)

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

A **multiplexagem de comprimentos de onda** permite transmitir múltiplos fluxos de dados de alta velocidade através de uma **única fibra**.

Cada **sinal digital é transmitido sob a forma de luz a um determinado comprimento de onda**, sendo os diversos comprimentos de onda combinados entre si recorrendo a dispositivos ópticos passivos, injetando-se o sinal resultante numa **única fibra ótica**.

Do lado da **recepção**, filtros constituídos igualmente por elementos ópticos passivos separam os sinais ópticos correspondentes a cada comprimento de onda.

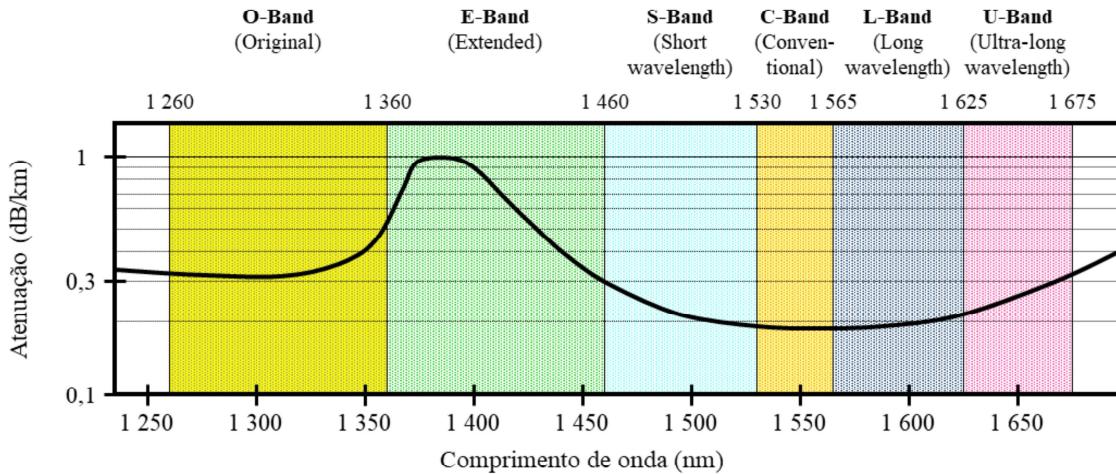
Os **sinais transmitidos na fibra não devem interferir entre si**, exigindo que as fontes de luz tenham uma **pureza espectral adequada**.

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Princípios básicos

Bandas WDM

- UIT definiu **6 bandas contíguas** que ajudam a especificar sistemas WDM
- estas bandas englobam as **2^a e 3^a janelas** dos sistemas clássicos



Definição das bandas de comprimentos de onda em sistemas WDM

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

As **bandas WDM** definidas pela UIT utilizam todos os comprimentos de onda desde um pouco mais abaixo da 2^a janela (incluída na banda “Original”) até comprimentos de onda acima da 3^a janela (incluída na banda “Convencional”).

As características de **atenuação** e **dispersão** em cada banda são muito diferentes entre si, sendo algumas mais desfavoráveis do que outras. Os **sistemas WDM utilizarão progressivamente as mais favoráveis** e só em fases posteriores se recorrerá às menos favoráveis, quando os requisitos de capacidade aumentarem.

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Princípios básicos

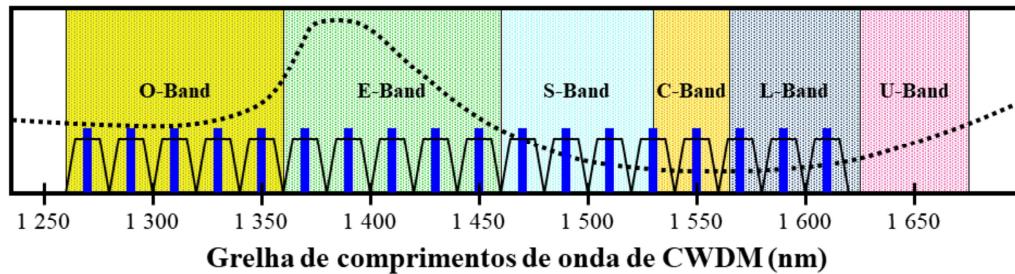
Primeiros sistemas de multiplexagem de comprimento de onda

- até cerca de **4 comprimentos de onda**
- pré-normalização → dificultou oferta de lasers com comprimentos de onda *standard*

Multiplexagem esparsa de comprimento de onda (**CWDM – Coarse WDM**)

- espaçamento moderado de comprimentos de onda → 20 nm
- possível utilizar **lasers sem controlo de estabilidade** de comprimento de onda
- **grelha de comprimentos de onda normalizada pela UIT**

$$\lambda = 1270 + n \times 20 \text{ (nm)} \quad n = 0 \dots 17$$



Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Podemos distinguir **três fases de evolução** dos sistemas WDM:

- Uma **primeira fase** em que foi utilizado um número reduzido de comprimentos de onda, não normalizados, com as dificuldades inerentes de interoperação entre sistemas.
- Numa **segunda fase**, a UIT definiu um grid de 18 comprimentos de onda (CWDM – *Coarse WDM*), com espaçamento de 20 nm, um valor compatível com a tecnologia de fabricação de lasers, em termos de pureza espectral.

(continua na página seguinte)

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Princípios básicos

Multiplexagem densa de comprimento de onda (**DWDM – Dense WDM**)

- várias **dezenas** (futuramente **centenas**) de comprimentos de onda
- necessário utilizar mecanismos de controlo de estabilidade dos lasers
- grelhas de frequências normalizadas pela UIT
 - centraduras a 193,1 THz (C-Band)
 - espaçamentos de 12,5 / 25 / 50 / 100 GHz e múltiplos de 100 GHz
- **bandas prioritárias:** S-Band, C-Band, L-Band

$$\text{espaçamento de } \mathbf{12,5 \text{ GHz}} \rightarrow f = 193,1 + n \times 0,0125 \text{ (THz)}$$

$$\text{espaçamento de } \mathbf{25 \text{ GHz}} \rightarrow f = 193,1 + n \times 0,025 \text{ (THz)}$$

$$\text{espaçamento de } \mathbf{50 \text{ GHz}} \rightarrow f = 193,1 + n \times 0,05 \text{ (THz)}$$

$$\text{espaçamento de } \mathbf{100 \text{ GHz}} \rightarrow f = 193,1 + n \times 0,1 \text{ (THz)}$$

n – inteiro positivo ou negativo, incluindo 0

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Podemos distinguir três fases de evolução dos sistemas WDM (cont.):

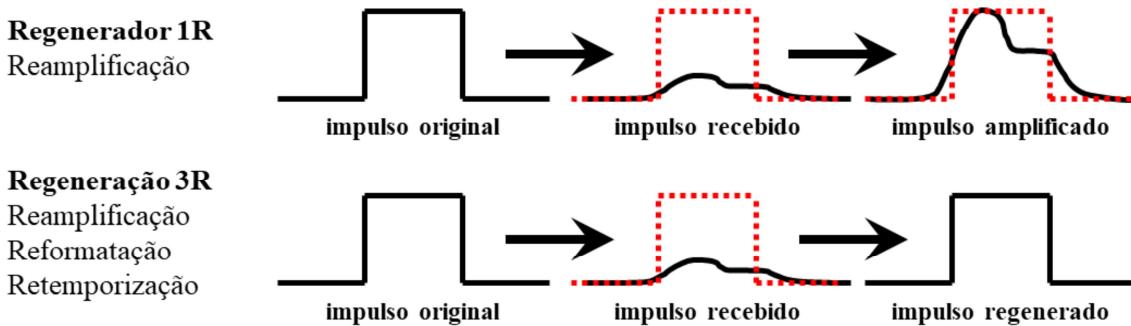
- Uma **primeira fase**... (página anterior)
- Numa **segunda fase**... (página anterior)
- Numa **terceira fase**, definiu-se um sistema evolutivo com densidade de multiplexagem flexível (DWDM – *Dense WDM*), ou seja, com espaçamentos de portadoras definidos entre 100 GHz (menor densidade) e 12,5 GHz (maior densidade) e **utilização prioritária das bandas em torno da 3ª janela**.

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Elementos de rede

Repetidor

- puramente ótico → já é possível **regeneração 3R**
- com conversão O-E-O → mais complexo mas temporização mais precisa



Formas de onda em repetidores ópticos e regeneradores

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Embora o **alcance de ligações ponto-a-ponto seja cada vez maior**, a utilização de **repetidores intermédios** torna-se necessária nas **ligações mais longas**.

Já existem regeneradores **3R puramente óticos** que podem ser utilizados nas ligações mais longas em associação com regeneradores 3R eletrónicos.

Um **regenerador 1R** faz apenas a reamplificação do sinal ótico. Os amplificadores ópticos são dispositivos analógicos que adicionam ruído ao sinal, sendo que este o ruído se vai acumulando ao longo de uma cadeia de amplificadores. Depois do sinal ótico passar por vários amplificadores, o ruído pode ser tal que contribui para aumentar os erros na transmissão digital.

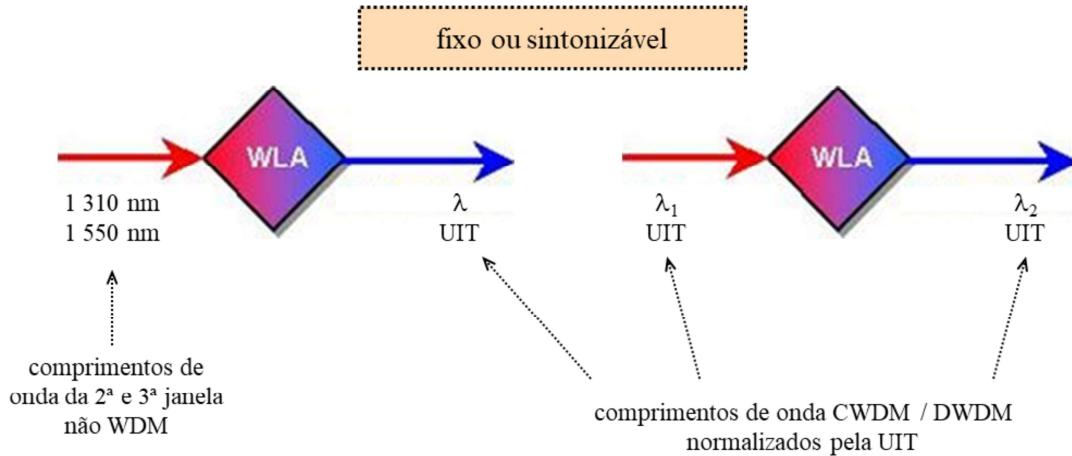
Um **regenerador 2R**, para além da reamplificação do sinal ótico, faz a reformatação do impulso que vemos na figura do slide, recuperando a sua forma original e contribuindo para a redução de erros na transmissão digital. O regenerador 2R resolve o problema da distorção do impulso ao longo da fibra mas é incapaz de lidar com o *jitter* (deslizamento temporal do impulso).

Um **regenerador 3R**, para além das funções anteriores, faz a retemporização do impulso. Esta é uma função mais complexa, uma vez que requer a comparação da temporização do impulso com um sinal de relógio de referência e o consequente atraso ou avanço temporal do impulso.

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Elementos de rede

Adaptador de Comprimento de Onda (WLA – *Wavelength Adaptor*)



Adaptadores de Comprimentos de Onda

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

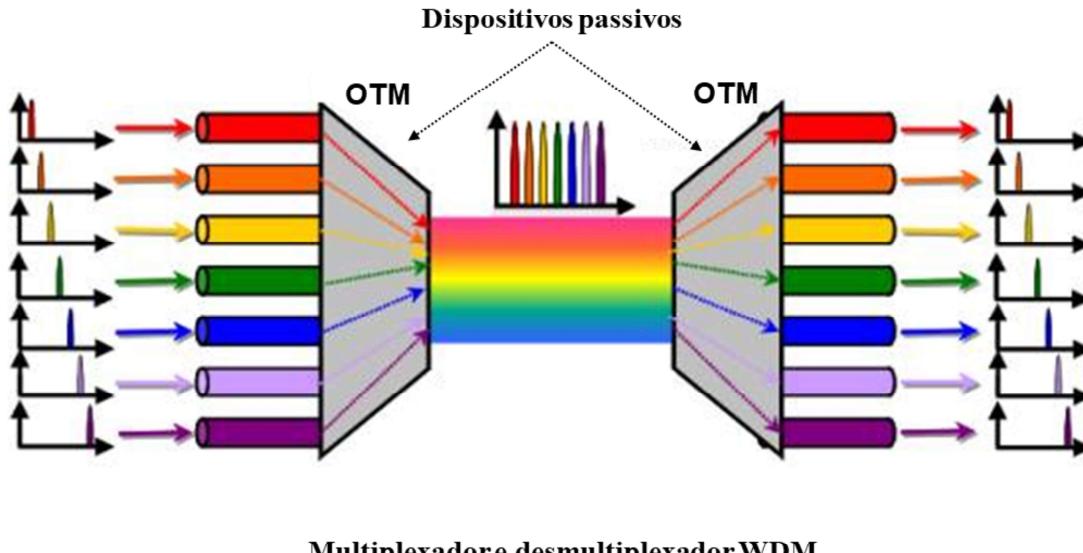
Os **adaptadores de comprimento de onda** (WLA – *Wavelength Adaptor*) foram introduzidos na interface de sistemas normalizados WDM (CWDM ou DWDM) com sistemas não WDM, nomeadamente sistemas SDH a operar na 2^a e 3^a janelas.

Com as tecnologias mais recentes, já é possível construir WLA sintonizáveis na fase de instalação, de acordo com os requisitos da rede.

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Elementos de rede

Multiplexador Ótico Terminal (OTM – *Optical Terminal Multiplexer*)



Sistemas de Telecomunicações

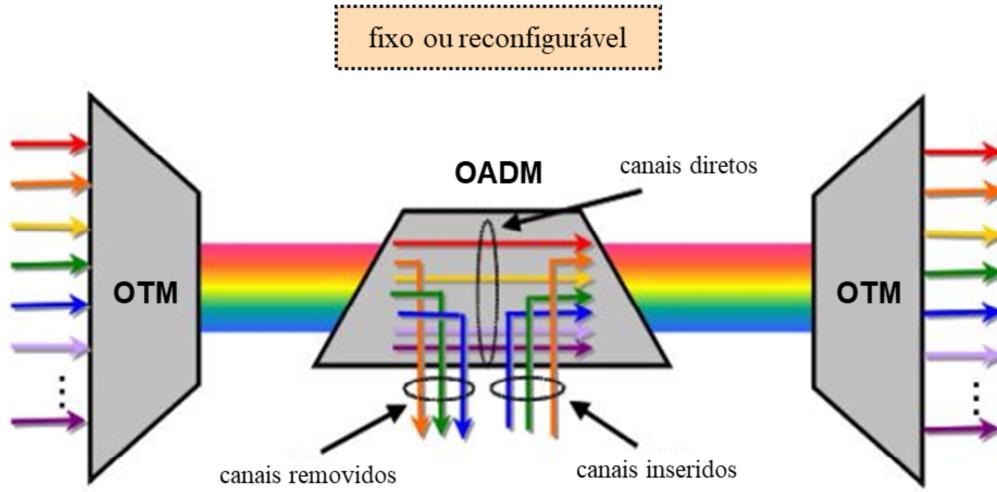
Sistemas de Transmissão

O **multiplexador ótico terminal** (OTM – *Optical Terminal Multiplexer*) é o elemento de rede chave nesta tecnologia, permitindo a multiplexagem e desmultiplexagem de sinais óticos WDM normalizados para transmissão sobre uma única fibra ótica.

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Elementos de rede

Multiplexador Ótico de Inserção / Remoção (OADM – Optical Add-Drop Multiplexer)



Multiplexador e Desmultiplexador Óticos de Inserção / Remoção WDM

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

O **multiplexador ótico de inserção / remoção** (OADM – *Optical Add-Drop Multiplexer*) permite intercalar uma ligação WDM, removendo um conjunto de canais para outras ligações, inserindo-os novamente no sentido contrário.

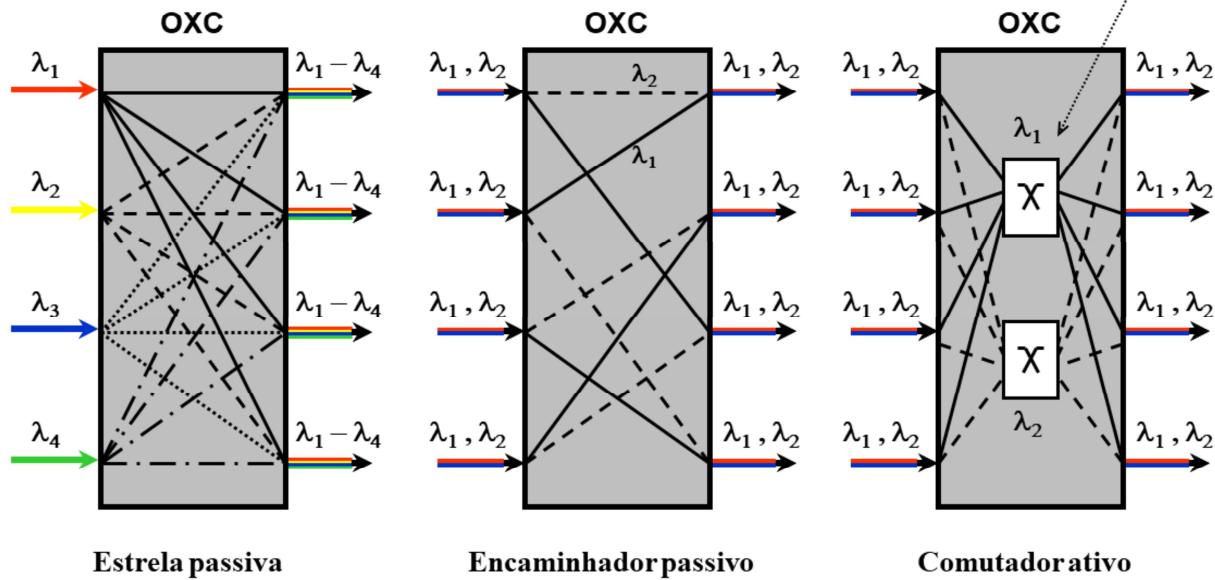
Alguns canais da ligação WDM são inalterados.

Avanços tecnológicos mais recentes permitiram desenvolver OADM reconfiguráveis (ROADM – *Reconfigurable OADM*) em termos dos comprimentos de onda que são removidos/inseridos ou mantidos inalterados na ligação. Deste modo, os equipamentos tornam-se mais flexíveis não só na fase de instalação, mas também ao longo do tempo de vida útil, em que é expectável que a rede venha a ser reconfigurada para diferentes cenários.

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Elementos de rede

Nós de Interligação Ótica (OXC – Optical Cross-Connects)



Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Os **nós de interligação ótica** (OXC – *Optical Cross-Connects*) permitem vários cenários de interligação de sinais óticos WDM:

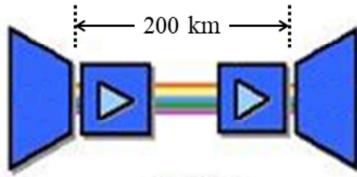
- A **estrela passiva** admite n entradas com sinais óticos em comprimentos de onda distintos, combinando estes sinais em p saídas WDM. Tem um **função equivalente a p OTM**.
- O **encaminhador passivo** admite n entradas WDM cada uma delas com diferentes comprimentos de onda, direcionando cada comprimento de onda de entrada para uma saída determinada.
- O **comutador ativo** tem uma função semelhante ao anterior, mas dispõe de comutadores internos por comprimento de onda que permitem a reconfiguração na fase de instalação ou posteriormente, na fase de exploração.

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

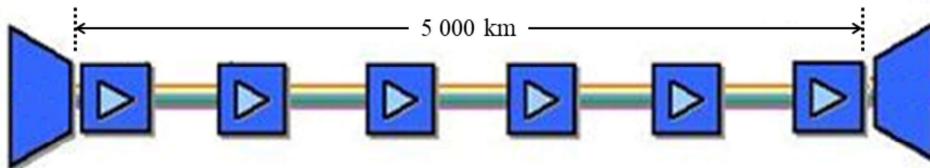
Topologias de rede

Ligaçāo ponto-a-ponto

- saltos máximos sem amplificação limitados pela **sensibilidade do receptor**
- saltos máximos sem regeneração electrónica limitados pela **dispersão temporal**



Salto máximo
sem amplificação



Salto máximo
com amplificação
sem regeneração
electrónica

Ligações ponto-a-ponto sem e com amplificação

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

A multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM) complica o processo de regeneração. A grande maioria dos regeneradores eletrónicos ou ópticos conseguem processar apenas um canal óptico de cada vez. Por essa razão, o sinal WDM tem que ser desmultiplexado antes da regeneração de cada um dos canais separadamente.

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Topologias de rede

Transporte de sinais ópticos não WDM



Ligações ópticas sobre WDM

Sistemas de Telecomunicações

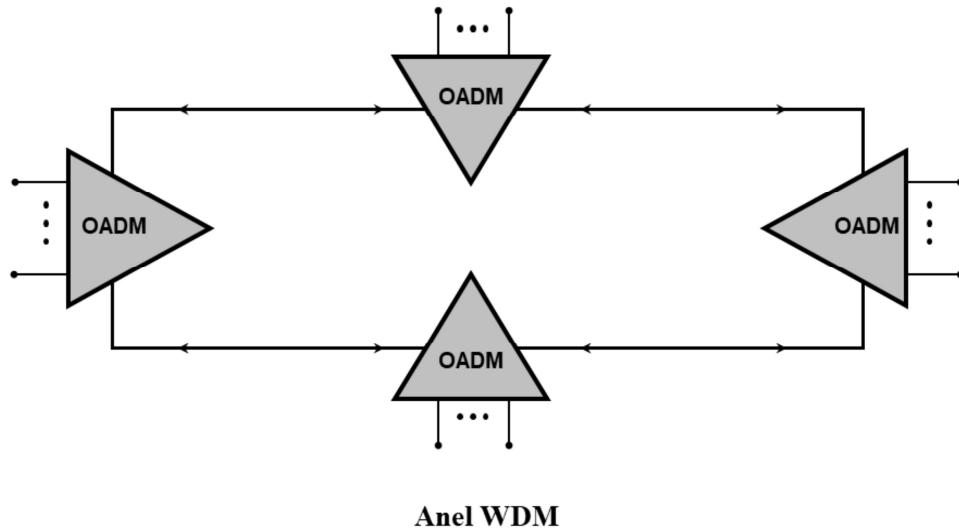
Sistemas de Transmissão

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Topologias de rede

Anéis

- agregação / distribuição de tráfego de alta capacidade



Sistemas de Telecomunicações

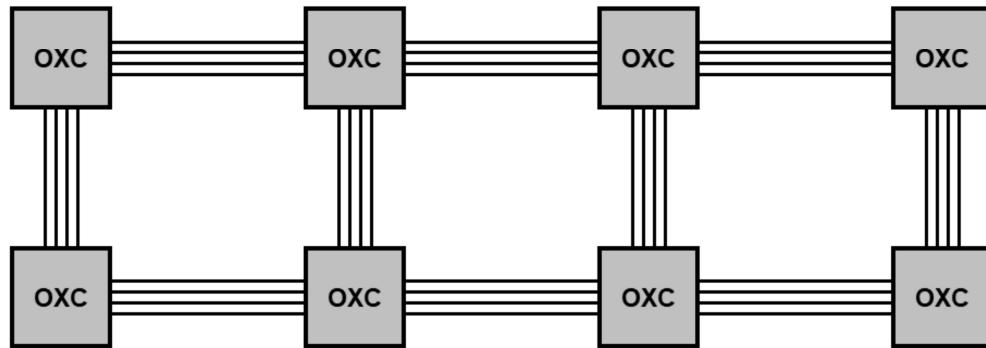
Sistemas de Transmissão

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Topologias de rede

Malhas

- núcleo de **muito alta capacidade** da rede de transporte
- sistemas operacionais com **dezenas de Tbit/s** de capacidade



Malha WDM

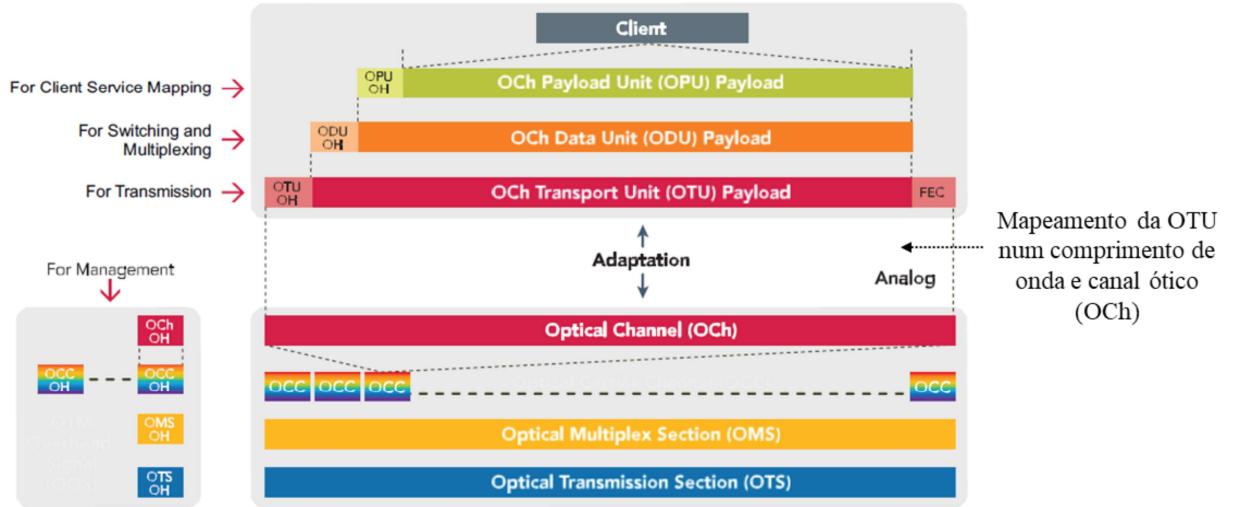
Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Relação entre DWDM e OTN

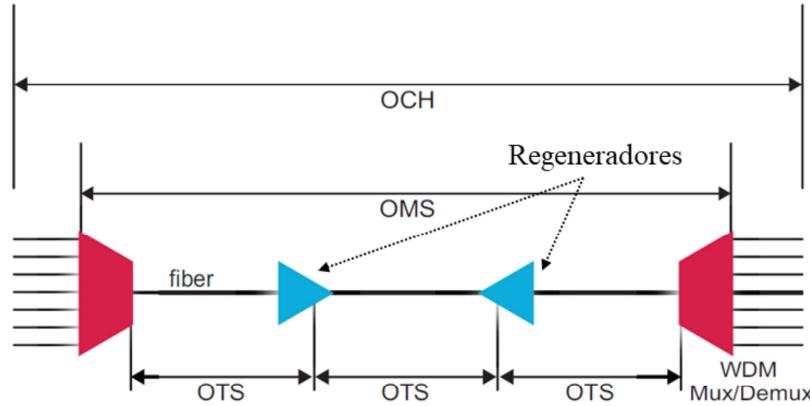
- OTN é um método normalizado para o transporte transparente de serviços sobre DWDM
- OTN é o protocolo ideal para o transporte de Ethernet sobre DWDM



Sistemas de Telecomunicações

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

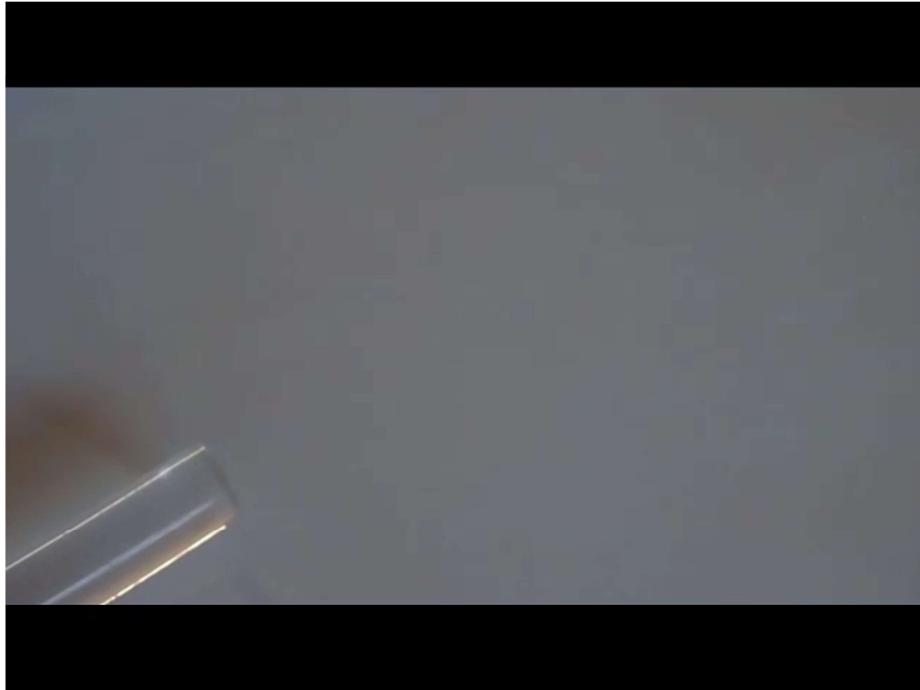
Relação entre DWDM e OTN



- *Optical Multiplex Section (OMS)*
 - secção entre dois dispositivos que fazem multiplexagem de comprimentos de onda numa fibra
- *Optical Transmission Section (OTS)*
 - secção de fibra entre dispositivos que executam funções sobre o sinal ótico

Sistemas de Telecomunicações

Vídeo – Ilustração WDM



Fonte: <https://youtu.be/0ctRKOtXJ5c> [Accessed: 19th March 2021]

Sistemas de Telecomunicações

Referências

ITU-T, “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid”, Rec. G.694.1, Oct. 2020.

Sistemas de Telecomunicações