



# Presente e Futuro das Redes de Transporte Ópticas

**Seminário “The Road Towards Packet  
Optical Transport Networks”  
ISCTE, 9 Abril 2013**

**João Pires (jpires@lx.it.pt)**

Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores, IST  
& Instituto de Telecomunicações

---



# Agenda

---


- **Aspectos introdutórios**
- **Evolução e realidade actual**
- **O desafio de 400 Gb/s e 1 Tb/s por canal**
- **Redes de transporte e comutação**
- **Conclusões**



- **Aspectos introdutórios**
- Evolução e realidade actual
- O desafio de 400 Gb/s e 1 Tb/s por canal
- Redes de transporte e comutação
- Conclusões

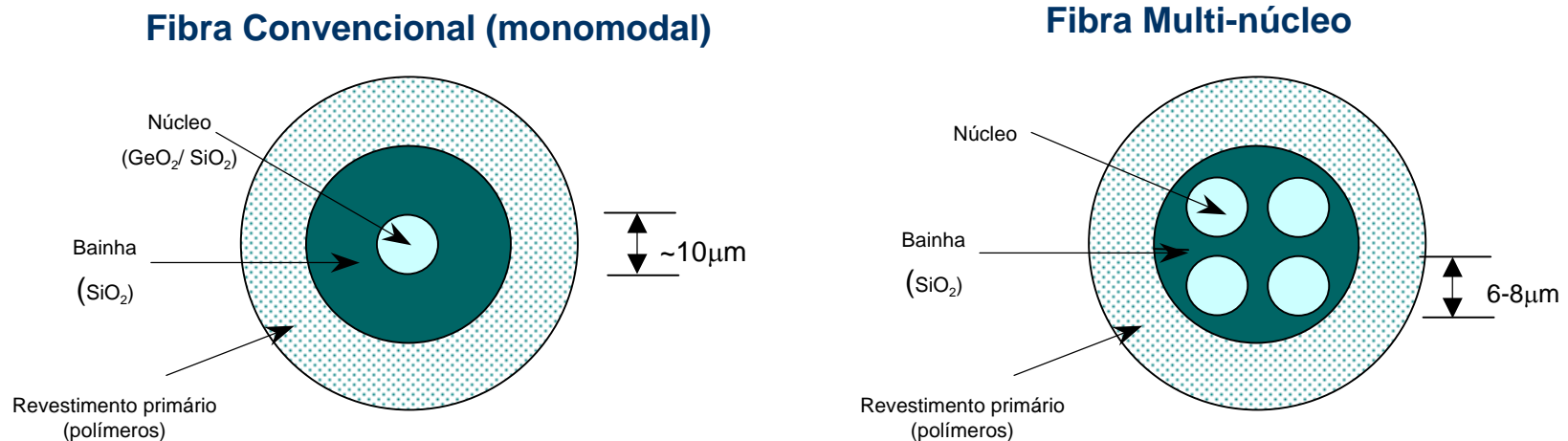


# O que é uma Rede Óptica?

- Uma rede de transporte óptica é uma rede de transporte de telecomunicações em que a transmissão de dados é feita no domínio óptico, usando fibras ópticas.
- As redes ópticas podem ser classificadas em Opacas, Transparentes ou Translúcidas de acordo com o tipo de comutação/processamento de sinal usado nos nós.
- Nas redes opacas os nós operam no domínio eléctrico e por isso todos requerem conversões OEO (Ex: **Redes SDH**).
- Nas redes transparentes os nós operam totalmente no domínio óptico (**Redes DWDM**).  **Foco principal desta apresentação**
- As redes translúcidas são redes híbridas, com alguns nós transparentes e outros opacos (**Redes OTN**).

# A Fibra Óptica

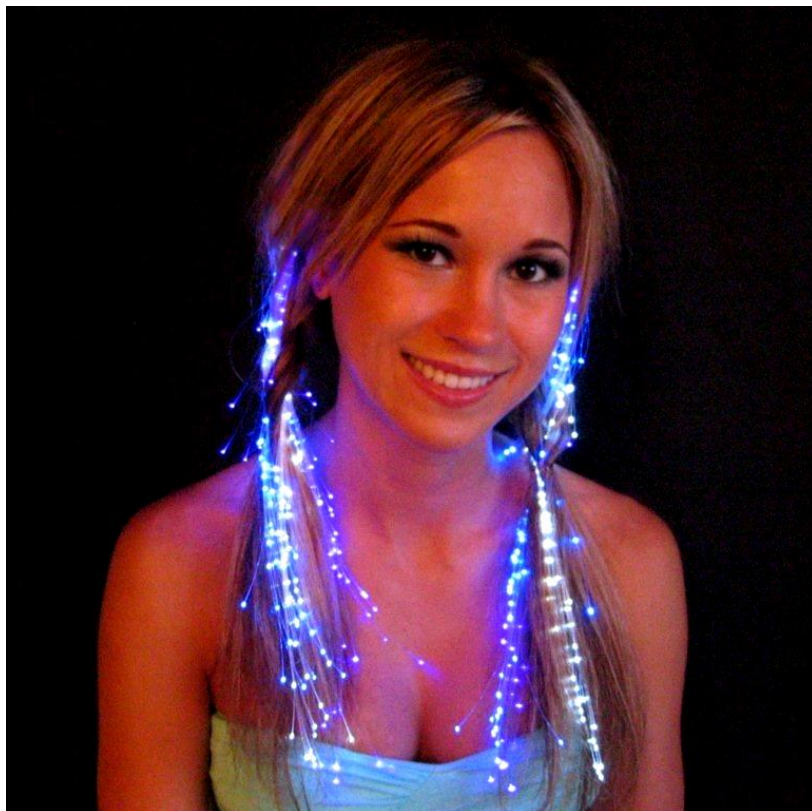
- Um fibra óptica é um guia de ondas cilíndrico que guia as ondas luminosas ao longo do seu eixo. As fibras ópticas usadas nas telecomunicações são fabricadas usando **vidro de sílica** ( $\text{SiO}_2$ ).
- Estrutura genérica de uma fibra óptica



- O diâmetro da bainha nas fibras convencionais é da ordem dos  $125\mu\text{m}$  e nas fibras multi-núcleo de  $130-150\mu\text{m}$ .

## Aplicações

- As aplicações das fibras ópticas são muito variadas: medicina, telecomunicações, indústria, aviónica, decoração, moda, etc.



# Fibra Óptica & Telecomunicações

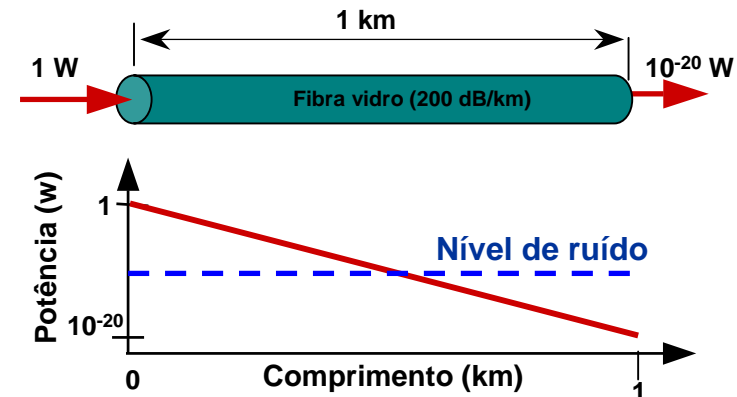
Charles Kuen Kao  
高錕



**Prémio Nobel da Física 2009**

“ por contribuições relevantes relativamente à transmissão da luz na fibra para comunicações ópticas”

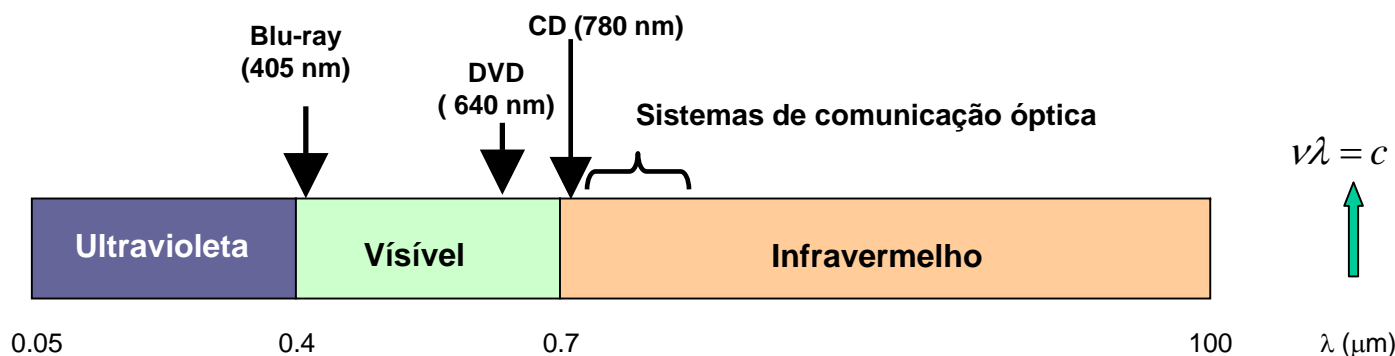
- Propôs em 1966 a utilização das fibras de vidro ( $\text{SiO}_2$ ) nas telecomunicações.
- A atenuação do vidro nessa altura era de 200 dB/km.



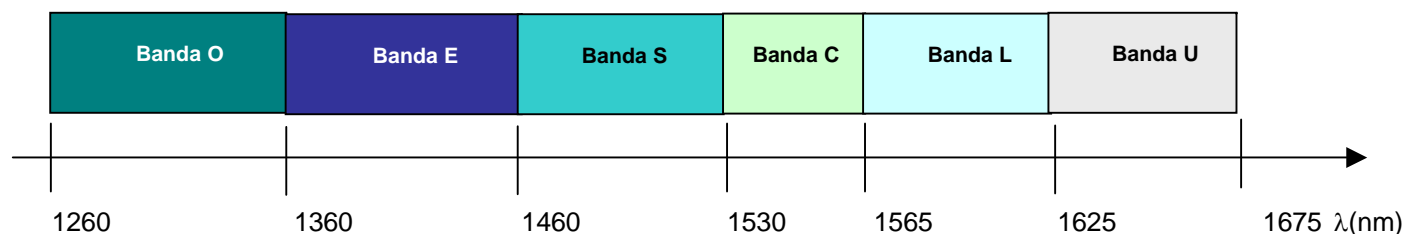
- Demonstrou que a atenuação era devida a impurezas e que se podiam reduzir por purificação.
- Hoje tem-se  $\sim 0.2$  dB/km (@  $1.55 \mu\text{m}$ ).

# Espectro Óptico e Bandas

- Os sistemas de comunicação óptica operam na banda do espectro electromagnético com comprimentos de onda entre os 800 e os 1600 nm, ou seja na região do infra-vermelho (não visível pelo olho humano).



- O ITU (*International Telecommunications Union*) definiu seis bandas passíveis de serem usadas pelos sistemas de comunicação sobre fibra óptica.

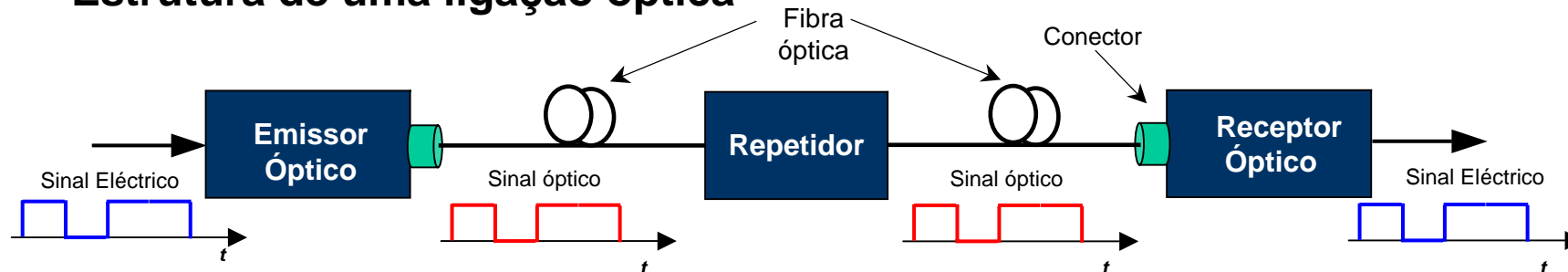


- As bandas mais usadas pelos sistemas comerciais são as bandas O e C.



# Sistema de Comunicação Óptica

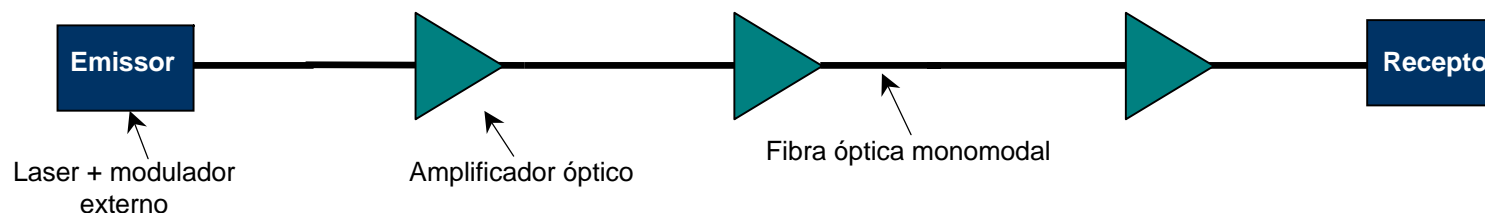
- **Estrutura de uma ligação óptica**



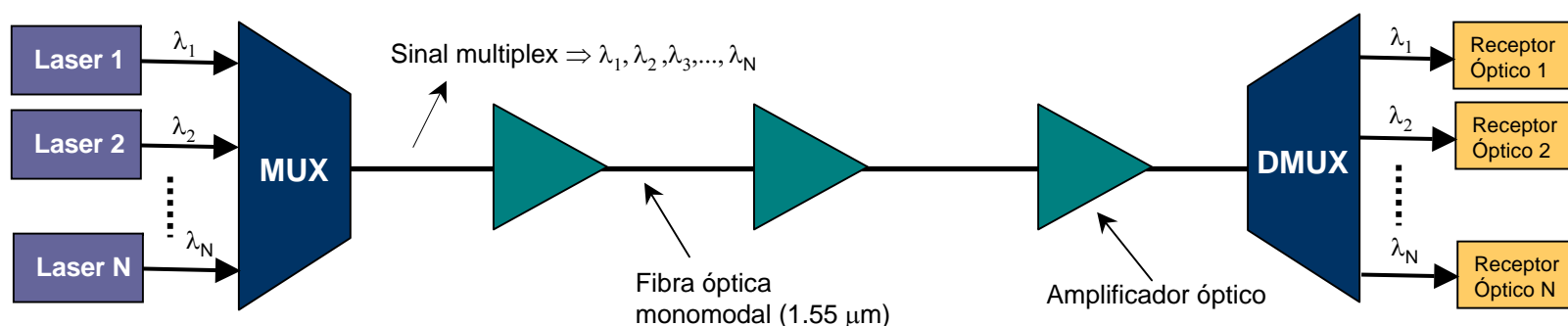
- **Emissor óptico:** consiste numa fonte óptica e em circuitos electrónicos; a fonte óptica é normalmente um **díodo laser**; faz a conversão dos sinais eléctricos em ópticos.
- **Receptor óptico:** consiste num **fotodíodo**, que é responsável por converter o sinal do domínio óptico para o domínio eléctrico, e por circuitos electrónicos apropriados para amplificar o sinal.
- **Repetidor:** pode ser um amplificador óptico, ou um regenerador; o primeiro amplifica o sinal óptico e o segundo dá ao sinal o formato original.
- **Fibra óptica:** consiste numa guia cilíndrico geralmente de vidro que permite a transmissão dos sinais ópticos à distância.

# Sistemas Monocanal & Multicanal

- Os sistemas **monocanal** usam multiplexagem por divisão no tempo ou TDM (*Time-Division Multiplexing*). Os repetidores podem ser regeneradores ou amplificadores ópticos.



- Os sistemas **multicanal** usam multiplexagem por divisão no comprimento de onda ou WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Os multiplexers agregam vários canais ópticos, cada um operando no seu comprimento de onda.

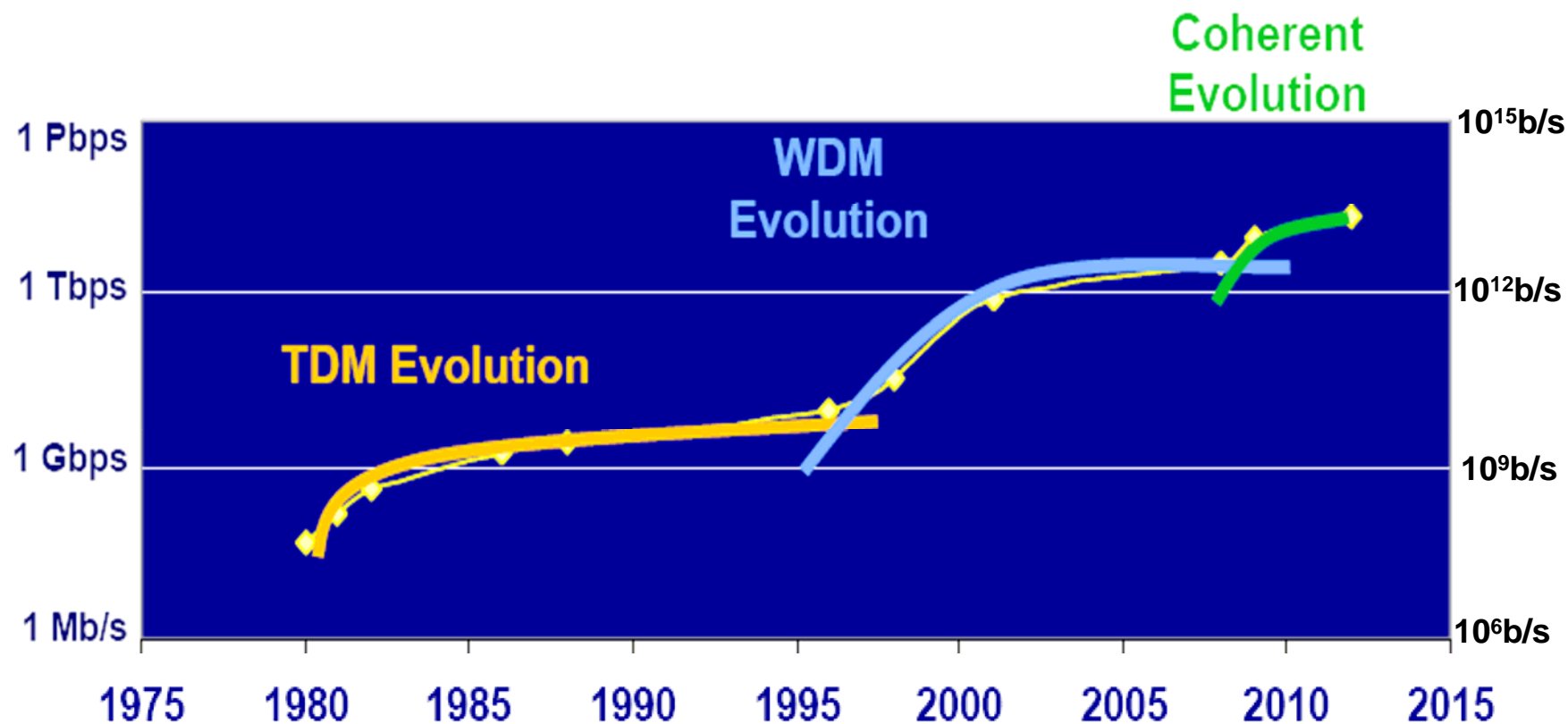




- Aspectos introdutórios
- **Evolução e realidade actual**
- O desafio de 400 Gb/s e 1 Tb/s por canal
- Redes de transporte e comutação
- Conclusões



# Paradigmas de Evolução

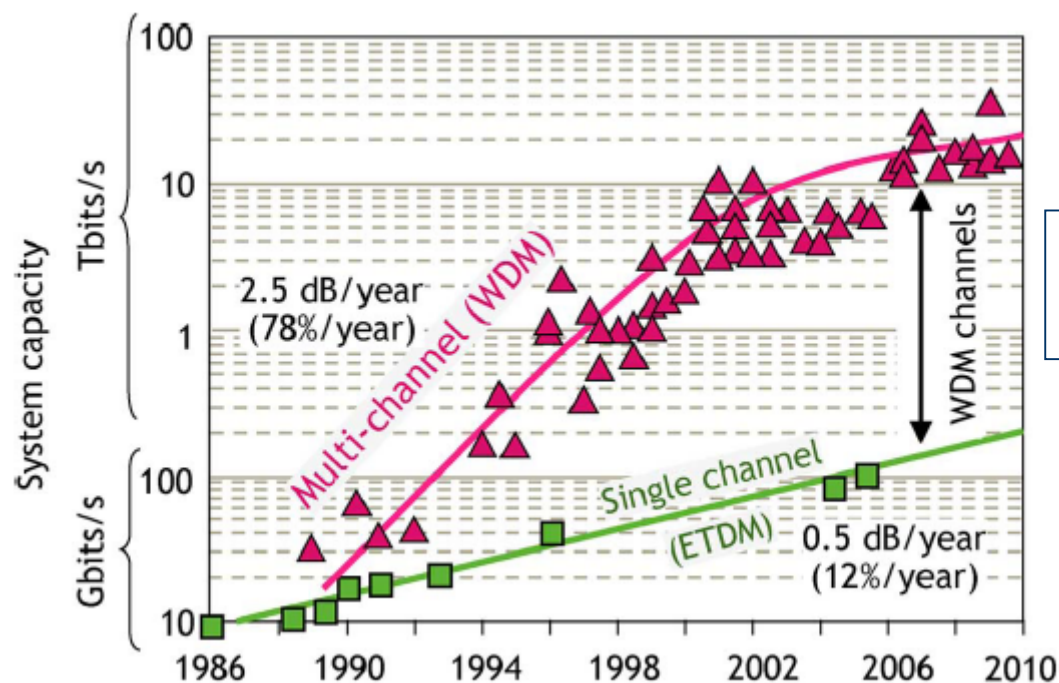


Fonte: P. Morin, "The New Economy, Global Megatrends Driving Optical Innovation," Nortel, OFC'09

1 Tb/s corresponde à transmissão simultânea de 100 000 canais de HDTV (@ 10 Mb/s)



## Capacidade dos Sistemas TDM vs WDM



Fonte: R. Essiambre *et al.*,  
"Capacity Limits of Optical  
Fibre Networks," JLT, p.  
662-701, Fev.2010

- O débito binário dos sistemas TDM (eléctricos) aumentou 10x durante duas décadas (10Gb/s → 1 Gb/s).
- O débito binário dos sistemas WDM aumentou cerca de 100x numa década. Esse aumento é devido ao aumento da banda dos amplificadores ópticos e sobretudo devido ao aumento da eficiência espectral.



# Hierarquias TDM

## Hierarquia Digital Síncrona (SDH)

Hierarquia	Sinal SDH	Débito (Mbit/s)
1 <sup>a</sup>	STM-1	155.52
2 <sup>a</sup>	STM-4	622.08
3 <sup>a</sup>	STM-16	2488.32
4 <sup>a</sup>	STM-64	9953.28

STM: *Synchronous Transport Module*

## Hierarquia de Transporte Óptica (OTH)

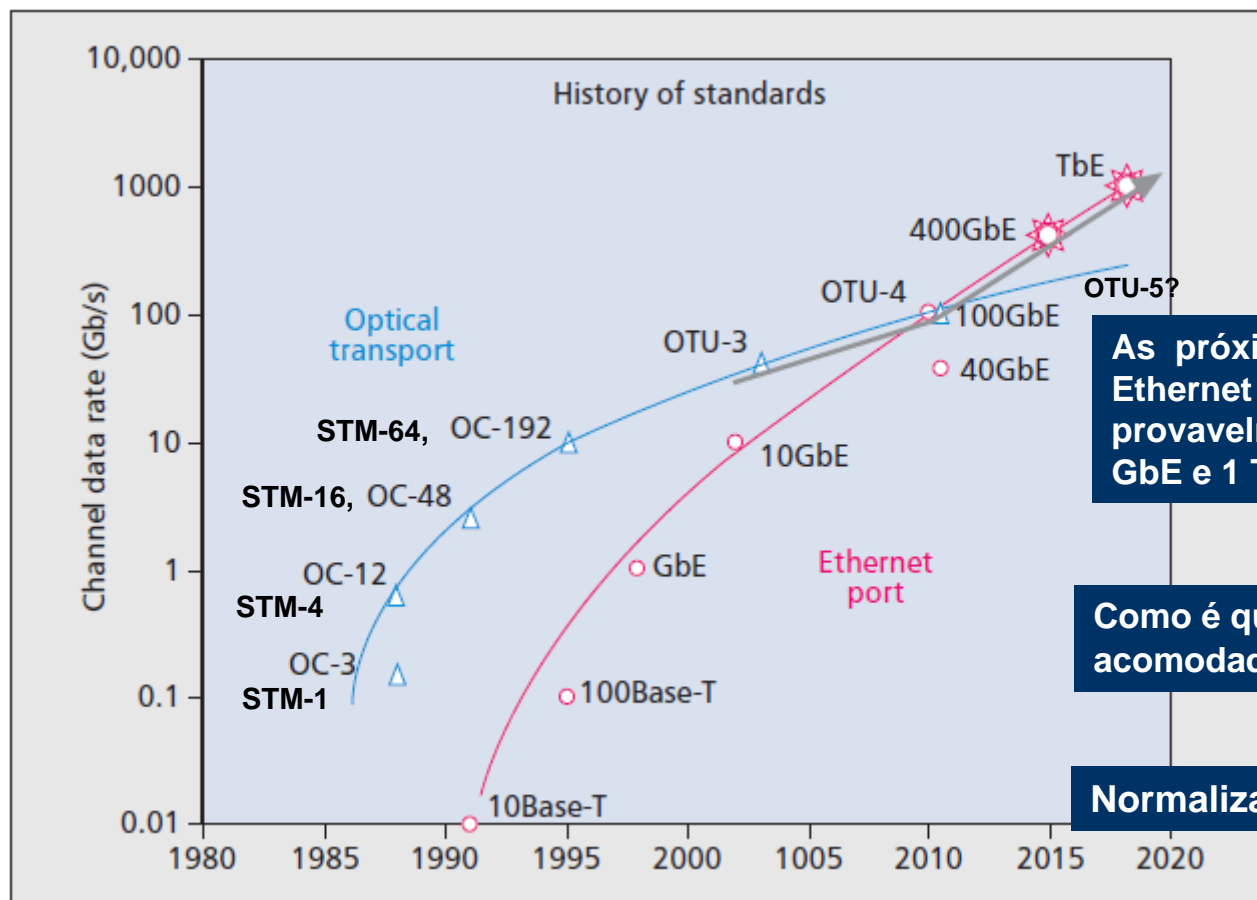
Hierarquia	Sinal OTH	Débito (Gbit/s)
1 <sup>a</sup>	OTU-1	2.666
2 <sup>a</sup>	OTU-2	10.709
3 <sup>a</sup>	OTU-3	43.018
4 <sup>a</sup>	OTU-4	111.809
5 <sup>o</sup>	OUT-5	449.219?

OTU: *Optical Transport Unit*

A Hierarquia de Transporte Óptica ou OTH (*Optical Transport Hierarchy*) corresponde à camada eléctrica da rede OTN (*Optical Transport Network*). A OTN foi normalizada em 2001 (ITU G.872) tendo em vista aplicações na rede de transporte de longa distância, operando a débitos entre 2.5 e 100 Gb/s. Entre outras, introduz na rede a funcionalidade FEC (*Forward Error Correction*) de modo a aumentar a distancia entre regeneradores.



# Normas Ethernet e de Transporte



As próximas interfaces de cliente Ethernet a definir pelo IEEE serão provavelmente as interfaces 400 GbE e 1 TbE .



Como é que esses fluxos serão acomodados na rede de transporte?



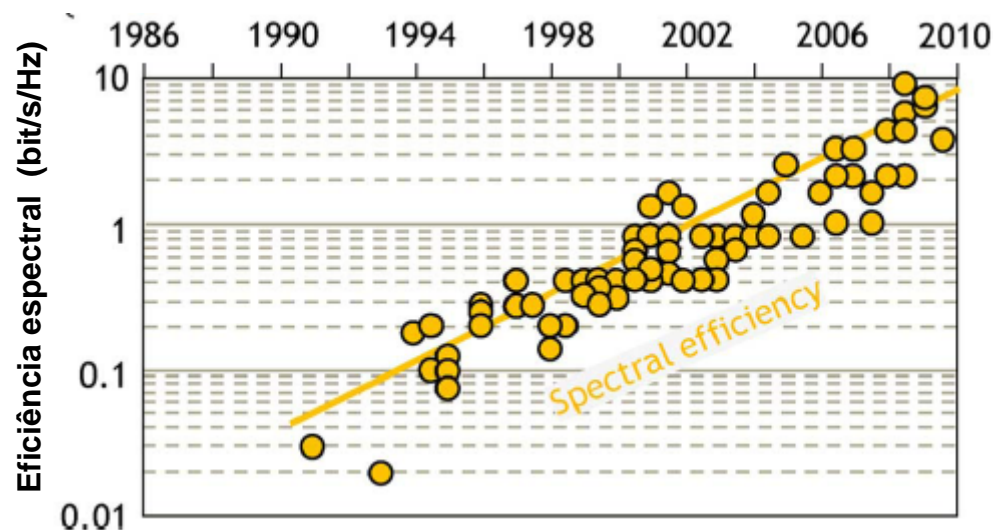
Normalização do OTU-5 e OTU-6?

Fonte: S. Gringeri et al, "Technical Considerations for Supporting Data Rates Beyond 100 Gb/s" IEEE Com. Magazine, p. 521-530, Fev. 2012



## Evolução da Eficiência Espectral

- A eficiência espectral ( $\epsilon$ ) é a medida do débito binário de informação que pode ser transmitido numa certa largura de banda e é expressa em bit/s/Hz.



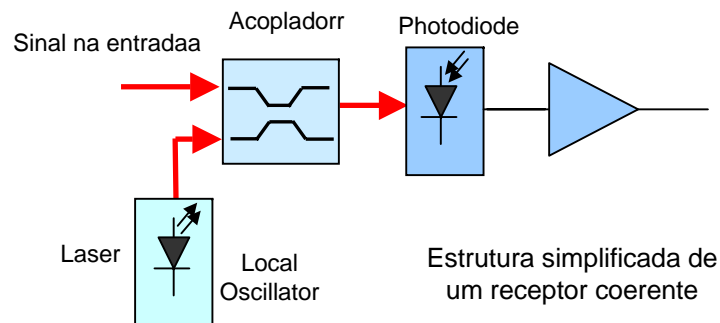
Fonte: R. Essiambre et al., "Capacity Limits of Optical Fibre Networks," JLT, p. 662-701, Fev.2010

- Os sistemas de comunicação óptica convencionais são baseados na modulação de intensidade ou OOK (*On/Off Keying*) e apresentam uma eficiência  $< 1$  bit/s/Hz. Para aumentar a eficiência é necessário recorrer a técnicas de modulação mais sofisticadas.

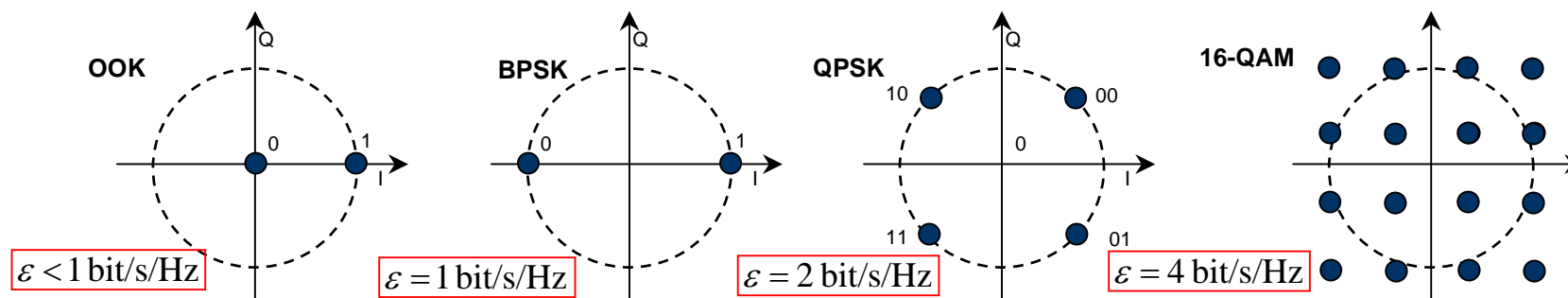


- Nos sistemas ópticos convencionais usa-se **detecção directa**, já que a informação é transmitida na intensidade do sinal. Para aumentar a eficiência espectral a informação terá de ser também transmitida na fase o que requer o uso de **detecção coerente**.

Na detecção coerente o sinal recebido é misturado com o sinal gerado por um oscilador local. Este funcionamento permite preservar a informação de fase e por isso suporta técnicas de modulação tais como o QPSK (*quadrature phase-shift-keying*) ou 16-QAM (*quadrature amplitude modulation*). Para operar a 100 Gb/s foi normalizada a modulação PM-QPSK (*polarization multiplexed quadrature phase-shift-keying*).



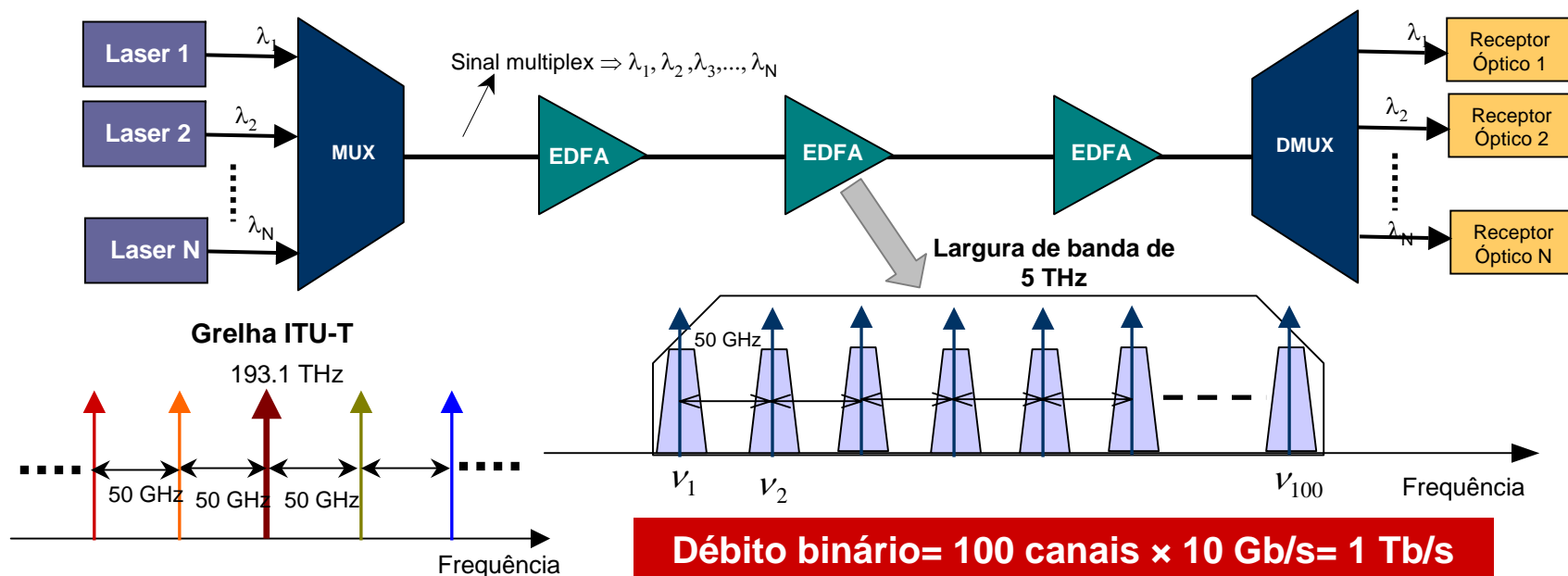
- Constelações/eficiências para diferentes esquemas de modulação





# Sistemas Multicanal: Alvo 1 Tb/s por Fibra

- **Características chave: Operação a 10 Gb/s por canal**  
**Modulação OOK e detecção directa**  
**Multiplexagem DWDM (Dense WDM)**  
**Grelha (ITU-T G.692) 50 GHz**
- **O número de canais é limitado pela largura de banda dos amplificadores ópticos EDFA que apresenta um valor típico de cerca de 5 THz.**





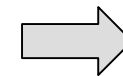
# Sistemas Multicanal: Alvo 10 Tb/s por Fibra

- Características chave: Operação a 100 Gb/s**  
**Modulação PM-QPSK e detecção coerente**  
**Multiplexagem DWDM**  
**Grelha de 50 GHz**

2 polarizações (X e Y)

PM-QPSK  $\rightarrow \epsilon = 2 \times 2 \text{ bit/s/Hz}$  111.8 Gb/s  $\rightarrow$  28 Gbaud  $\sim 40 \text{ GHz} < 50 \text{ GHz}$

**Débito binário = 100 canais  $\times$  100 Gb/s = 10 Tb/s**



**Actualmente uma realidade**

- Plataformas de transporte DWDM comerciais (2012)**

Fabricante	Equipamento	Capacidade	Número de $\lambda$ s
Ciena	6500 Packet Optical Platform	8.8 Tb/s	88 $\lambda$ s $\times$ 100 Gb/s
Alcatel-Lucent	1830 Photonic Services Switch	4.4Tb/s 8.8Tb/s	44 $\lambda$ s $\times$ 100 Gb/s 88 $\lambda$ s $\times$ 100 Gb/s
Nokia Siemens Networks	hiT7300	9.6 Tb/s	96 $\lambda$ s $\times$ 100Gb/s
Ericsson	Marconi MHL 3000 Core	3.2Tb/s	80 $\lambda$ s $\times$ 40 Gb/s



- Aspectos introdutórios
- Evolução e realidade actual
- **O desafio de 400 Gb/s e 1 Tb/s por canal**
- Redes de transporte e comutação
- Conclusões



# O Desafio dos 400G/1Tb/s por Canal

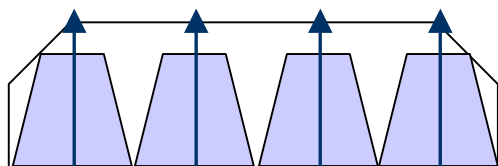
- Há várias estratégias que podem ser seguidas para dar resposta a esse desafio:
  - Utilização de modulações com eficiência espectral elevada ;
  - Utilização de supercanais (múltiplas portadoras);
  - Utilização de multiplexagem por divisão espacial.
- As técnicas de modulação a usar podem ser por exemplo PM 16-QAM, PM 32-QAM, etc.
- Um supercanal é um canal que usa várias portadores ópticas que funcionam como uma entidade única e são encaminhadas em grupo.
- A multiplexagem por divisão espacial ou SDM (*Space-Division Multiplexing*) é uma nova tecnologia que usa as fibras multi-núcleo como solução para aumentar a capacidade da fibra.

# Soluções para 400 Gb/s por Canal

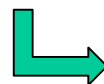
- 1) Modulação PM-16 QAM

PM-16QAM  $\rightarrow \epsilon = 2 \times 4 \text{ bit/s/Hz}$     449.2 Gb/s  $\rightarrow$  56 Gbaud  $\sim 80 \text{ GHz} > 50 \text{ GHz}$

- 2) Supercanais (4 x100 Gb/s)



PM-QPSK  $\rightarrow$  28 Gbaud  $\sim 30.8 \text{ GHz}$  por canal  
Banda do supercanal =  $30.8 \times 4 = 123.2 \text{ GHz} > 50 \text{ GHz}$



Maior alcance que a 1ª solução

- 3) Fibra óptica com 4 núcleos

PM-QPSK  $\rightarrow$  111.8 Gb/s  $\rightarrow$  28 Gbaud  $\sim 40 \text{ GHz} < 50 \text{ GHz}$  por núcleo

- As soluções 1 e 2 não são suportadas pela grelha de 50 GHz tradicional. Tal facto implica o desenvolvimento **de redes de grelha flexível**, em que banda de cada canal depende do seu débito binário e do tipo de modulação usada.



## Resultados Experimentais para 100Tb/s

- **102.3 Tb/s ( 224 × 548 Gb/s) na distância de 240 km**
  - Operação a 540 Gb/s por canal WDM
  - Banda C+L suportando 224 comprimentos de onda (grelha de 50 GHz)
  - Supercanais (OFDM) cada canal com modulação PM-64QAM
  - Fibra óptica de núcleo único de muita baixa atenuação (0.17 dB/km) e baixas não-linearidades

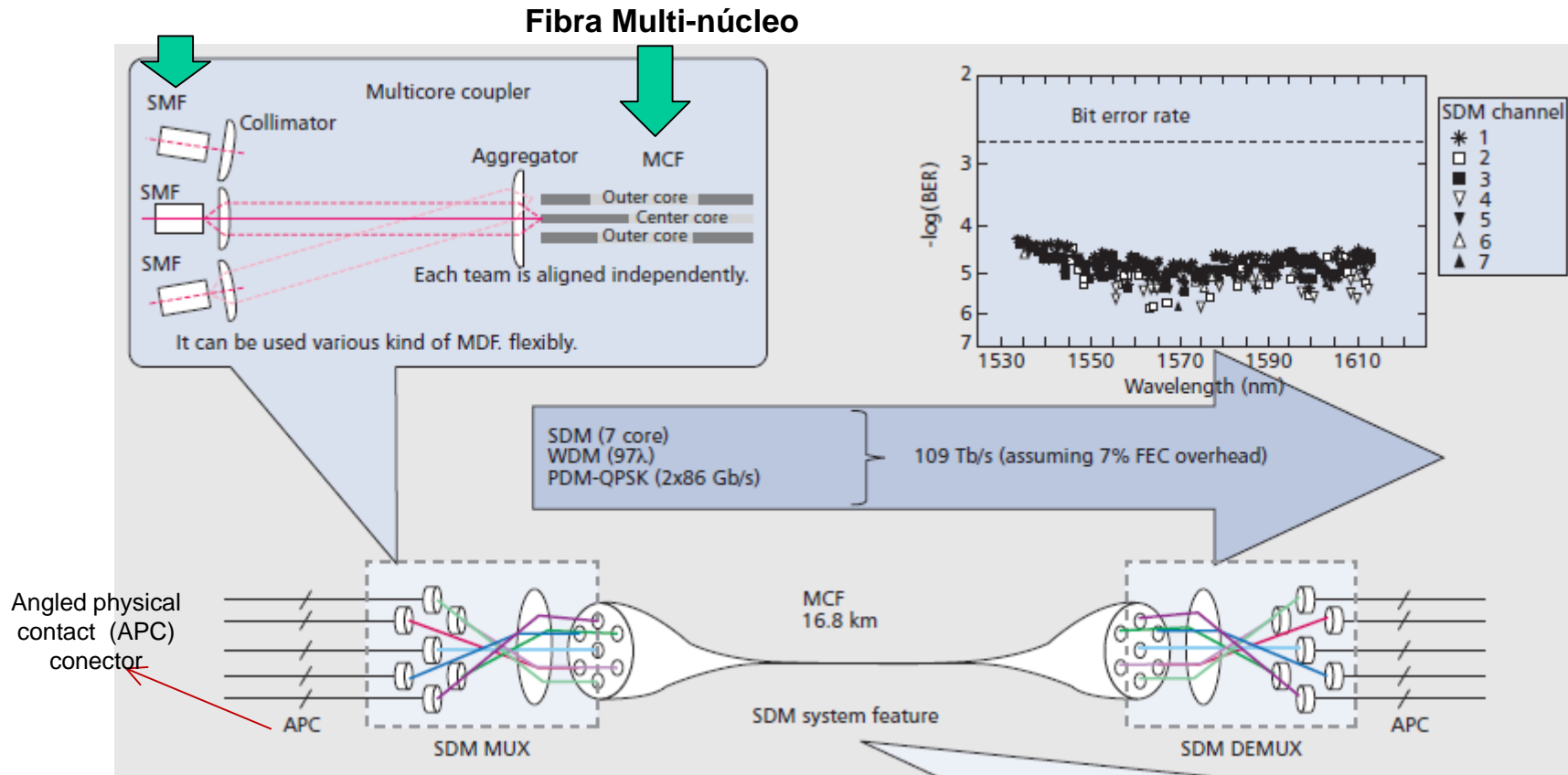
**Fonte:** A. Sano et al. “ 102.3-Tb/s (224x548-Gb/s) C- and Extended L-band .....” artigo PDP5C.3, OFC/NFOEC 2012

- **109 Tb/s (7 × 97 × 172 Gb/s) na distância de 16.8 km**
  - Operação a 172 Gb/s por canal
  - Sinal WDM com 97 comprimentos de onda
  - Modulação PM-QPSK de canal único
  - Multiplexagem SDM baseada numa fibra óptica multi-núcleo com 7 núcleos

**Fonte:** J. Sakaguchi et al. “ 109-Tb/s (7x97x172-Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK .” artigo PDPB6, OFC/NFOEC 2011



# Detalhes sobre a transmissão SDM 109 Tb/s



**Fonte:** T. Morioka et al. "Enhancing Optical Communications with Brand New Fibres", *IEEE Com. Magazine*, p. S31-S44, Fev. 2012





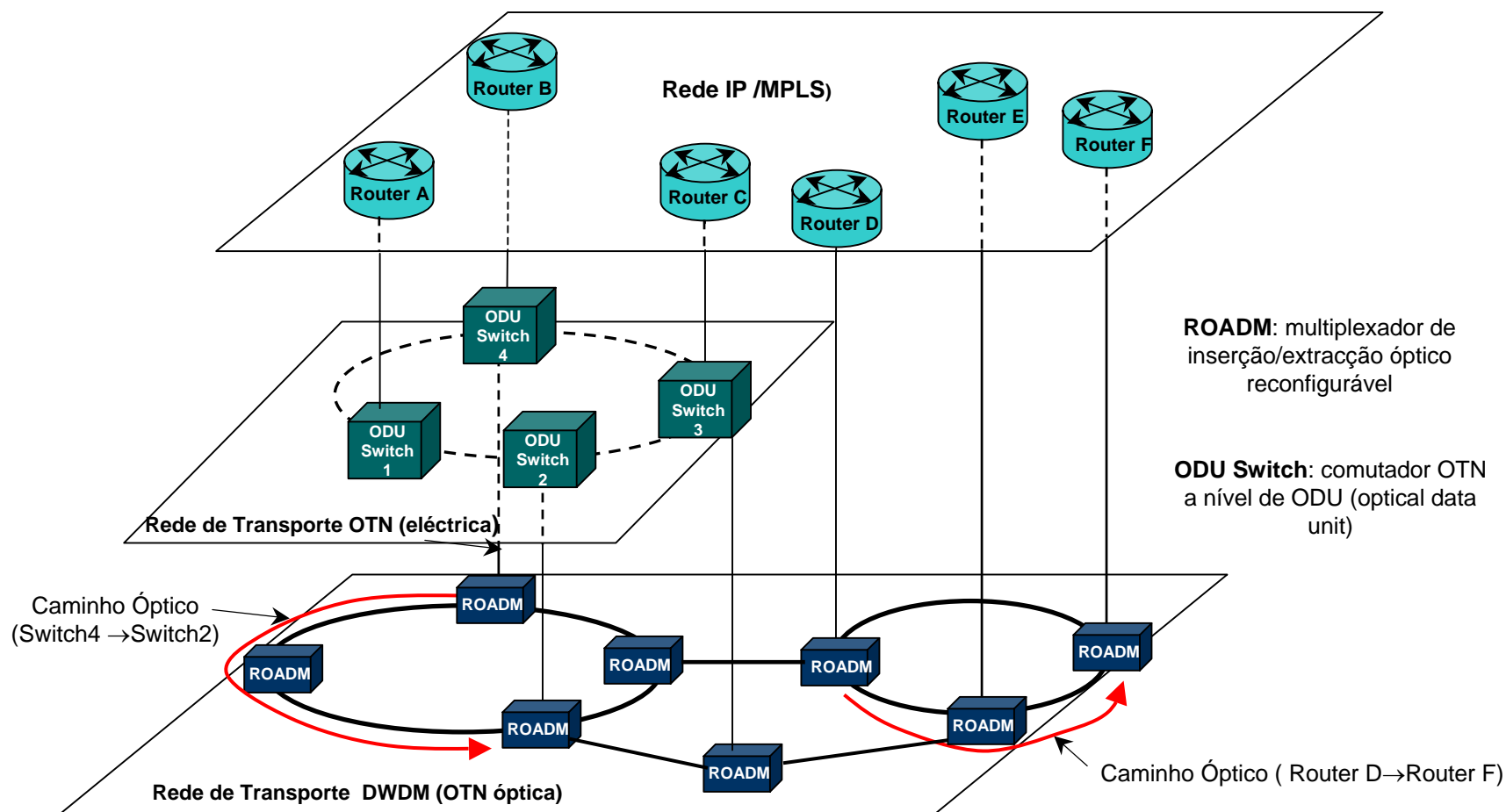
# Sumário

---

- Aspectos introdutórios
- Evolução e realidade actual
- O desafio dos 400 Gb/s e 1 Tb/s por canal
- **Redes de transporte e comutação**
- Conclusões

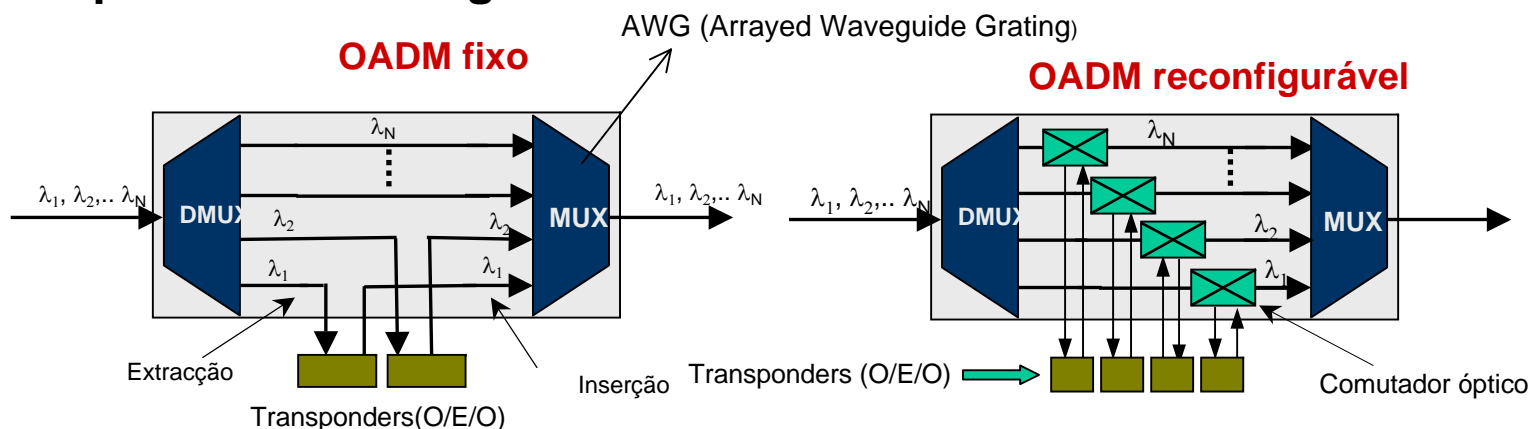


# A Rede de Transporte Óptica



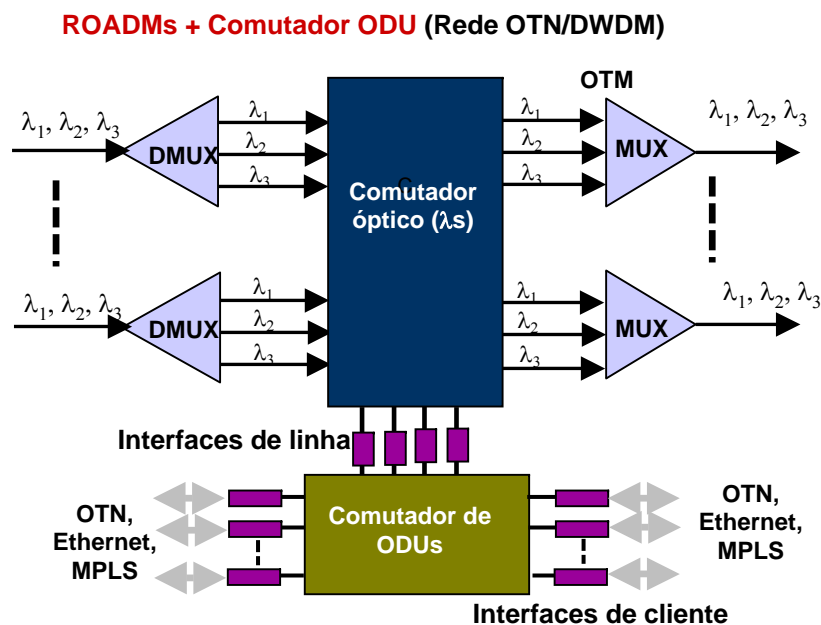
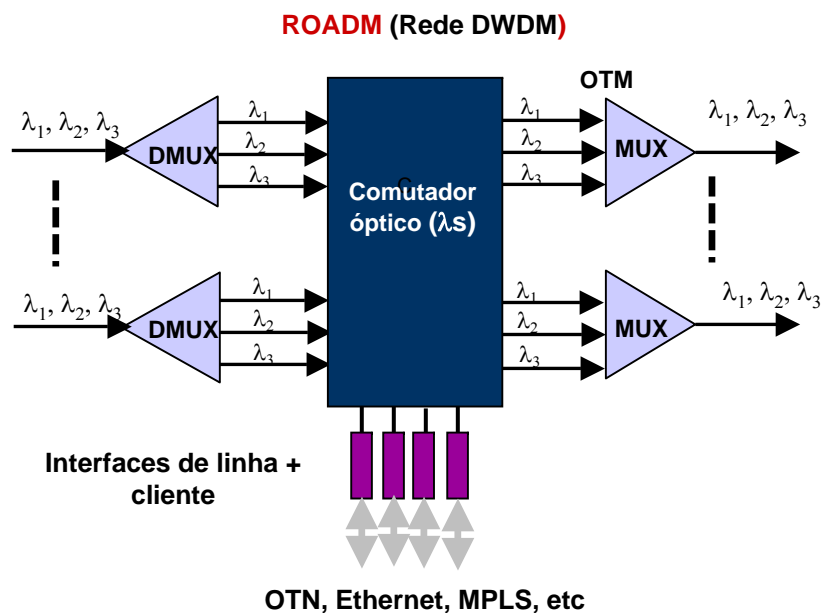
# Tipos de OADMs

- Num OADM o sinal WDM é desmultiplexado e os comprimentos de onda que requerem processamento local são extraídos e posteriormente inseridos. Os restantes comprimentos passam directamente do DMUX para o MUX.
- Os OADMs podem ser fixos ou reconfiguráveis. Nos primeiros o conjunto dos comprimentos de onda extraídos/inseridos é fixo, enquanto nos segundos pode ser alterado em resposta a mudanças nos padrões de tráfego.



# Configurações dos Nós da Rede

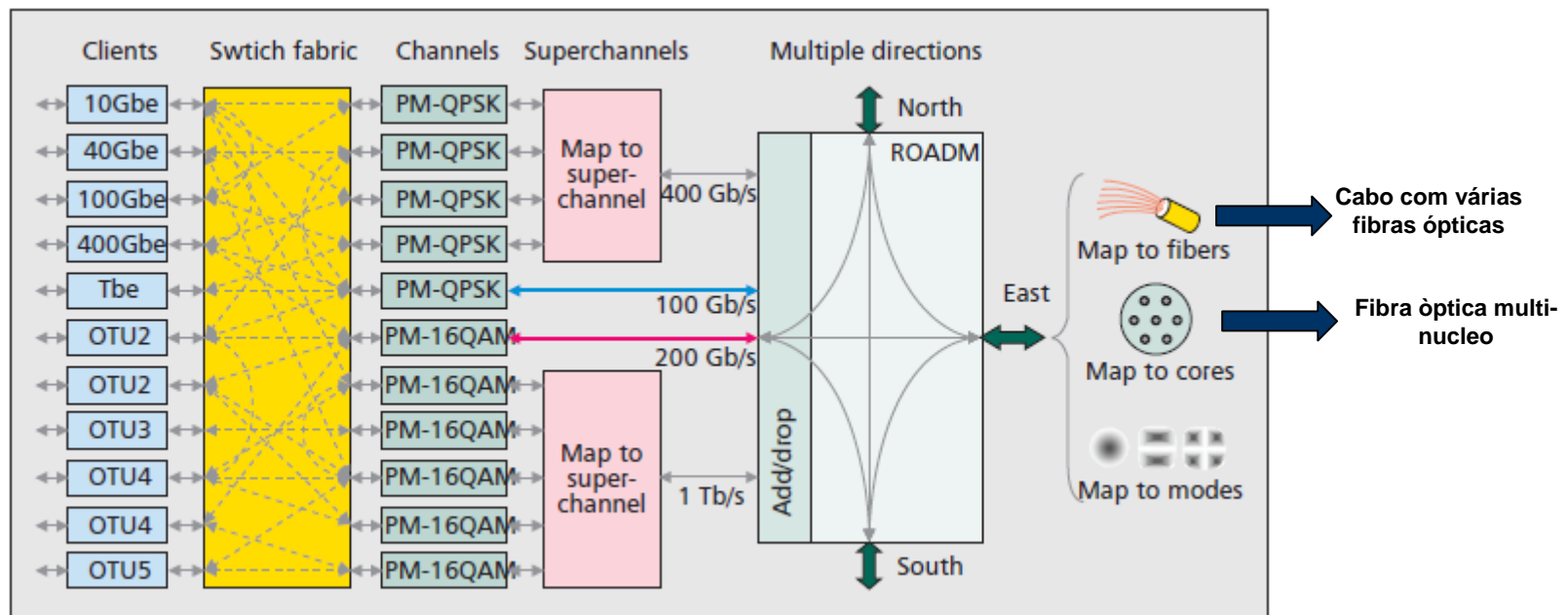
- Os ROADMs necessitam de apresentar um grau superior a 2 de modo a poderem ser usados em redes em malha e usam comutação óptica.
- A comutação de canais por ser feita com granularidade a nível do comprimento de onda (rede DWDM), ou com granularidade inferior usando comutação eléctrica a nível de ODUs (rede OTN/DWM)





# Estrutura Avançada de um Nó de Transporte Óptico

- A estrutura do nó representada abaixo suporta capacidades de canal de 100 Gb/s e superiores.
- Os sinais dos clientes são mapeados em canais usando uma matriz de comutação óptica, são depois convertidos em supercanais, comutados usando um ROADM para diferentes direcções e mapeados em fibras ópticas.



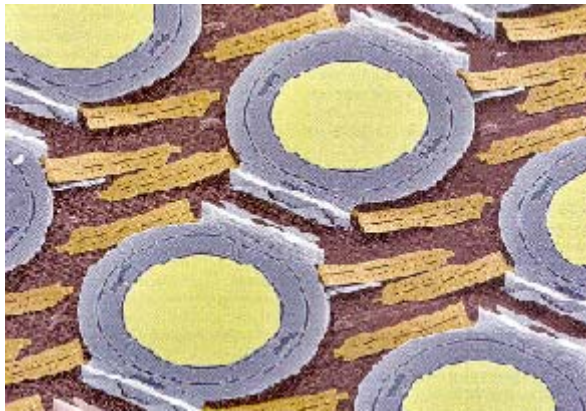
Fonte: T. J. Xia et al. "High-Capacity Optical Transport Networks", *IEEE Com. Magazine*, p. 170-177, Nov. 2012



# Soluções de Comutação Óptica

- A comutação óptica é o processo de direccionar o tráfego da entrada para a saída de um determinado nó no domínio óptico sem qualquer conversão O/E/O. Têm-se diferentes soluções:
- **Comutação de circuitos:** É uma técnica de comutação analógica e é baseada no estabelecimento de ligações físicas (circuitos).
- **Comutação de pacotes óptica:** A informação é estruturada em pacotes ópticos que são comutados no domínio óptico sem qualquer conversão para o domínio eléctrico.
  - ↳ Devido a limitações tecnológicas não é possível ser implementada actualmente
- **Comutação de rajadas óptica ou OBS( optical burst switching):** É uma solução híbrida entre as duas anteriores. Os pacotes são agregados em bursts no domínio eléctrico e o sinal de controlo (cabeçalho) é processado no domínio eléctrico.

- Há muitas soluções tecnológicas para implementar comutação óptica de circuitos. Um das soluções mais usadas é baseada em MEMS (*micro-electro-mechanical systems*)
- Os MEMS são dispositivos mecânicos em miniatura fabricados usando substratos de silício. Os comutadores MEMS consistem em espelhos miniatura móveis com dimensões da ordem das centenas de micrómetro.

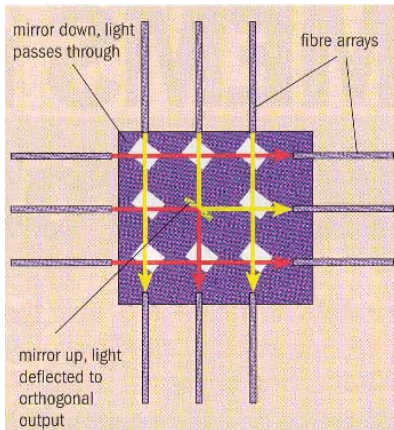


Os micro-espelhos são deflectidos de uma posição para outra usando técnicas electromagnéticas, electro-ópticas ou piezoeléctricas.

- A estrutura mais simples é a do espelho 2D . Num estado o espelho está paralelo com o substrato não deflectindo o feixe de luz. No outro estado o espelho move-se para uma posição vertical e o feixe de luz é deflectido. O tempo de comutação de um estado para outro é de cerca de **10 ms** em ambas as estruturas.

# Comutadores Ópticos com MEMS

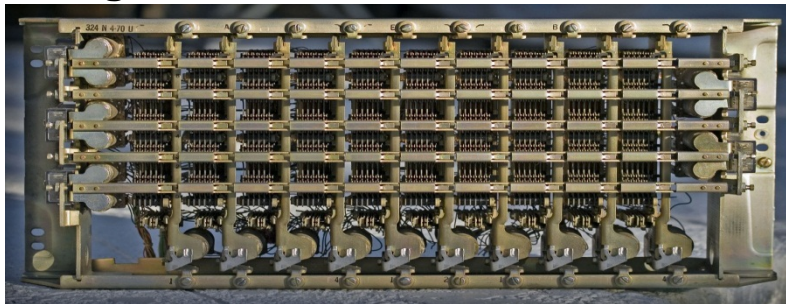
- Comutadores com espelhos 2D



O comutador baseado em espelhos 2D usa uma arquitectura barra-cruzada. Na configuração com fibras ópticas nas entradas e nas saídas é necessário colimar os feixes na saída e na entrada das fibras para reduzir a sua divergência.

A dimensão máxima dos comutadores deste tipo que é possível fabricar num único substrato está limitada a dimensões entre 32x32 a 64x64.

- Princípio de funcionamento tem algumas semelhanças com a dos comutadores electromecânicos crossbar usados na comutação telefónica analógica dos anos 1960/70 .



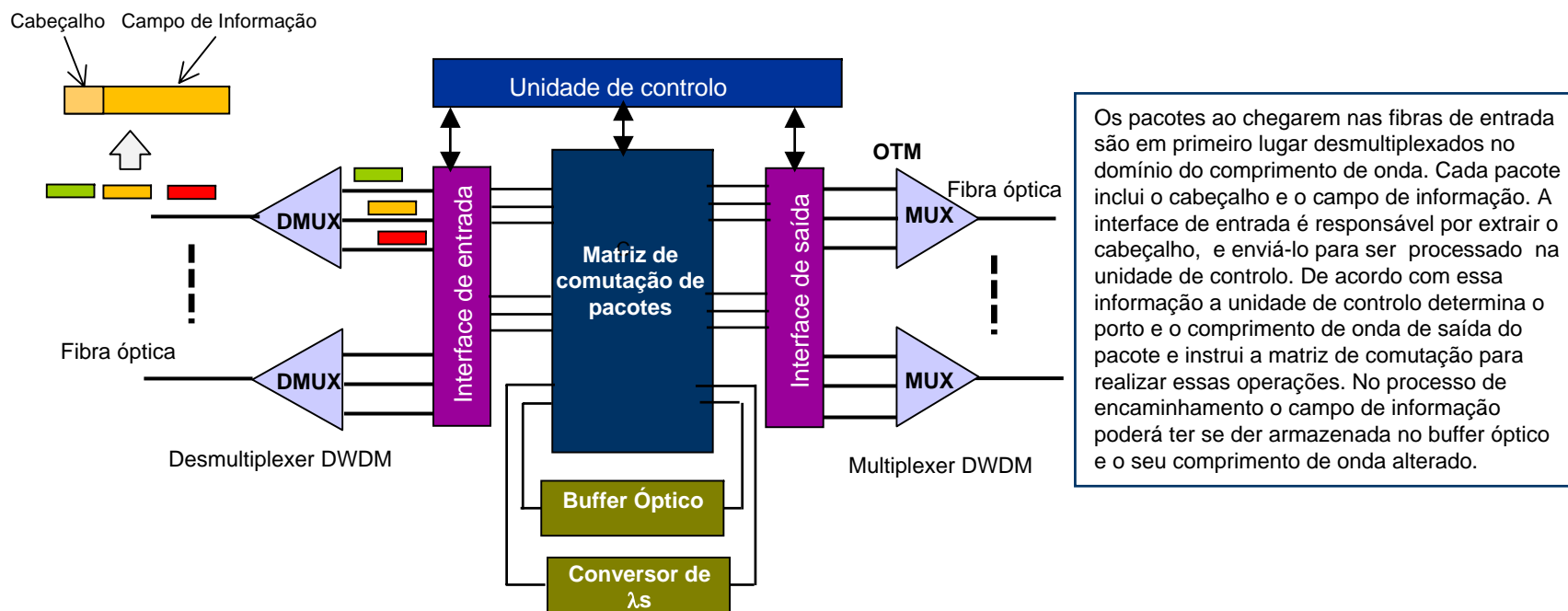
Comutador electromecânico crossbar de 100 pontos usados na comutação telefónica analógica fabricado pela Western Electric em Abril de 1970

Fonte: Wikipedia



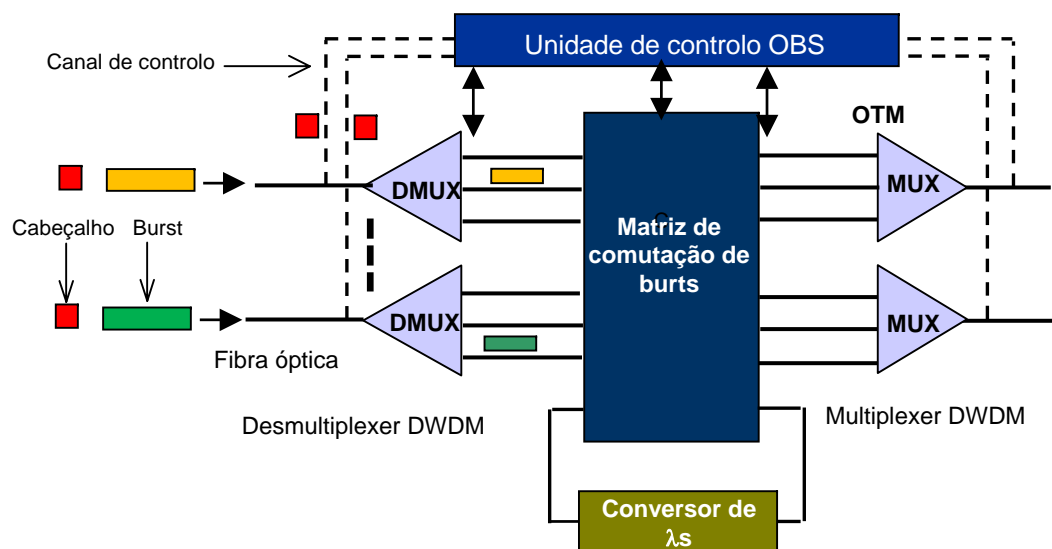
# Comutação de Pacotes Óptica

- A estrutura de um comutador de pacotes óptico inclui mux & demux DWDM, interfaces de entrada e de saída, matriz de comutação de pacotes óptica, buffers ópticos, conversores de comprimentos de onda, etc.
- **Atualmente não é realizável** devido à inexistência de buffers ópticos, comutadores ópticos ultra-rápidos (ns) e processadores ópticos (cabeçalho).



# Optical Burst Switching (OBS)

- Nas redes OBS usam-se buffers eléctricos na entrada da rede de modo a armazenar um certo número de pacotes que são depois agregados de modo a formar uma rajada (burst).
- Associado a cada burst existe um sinal de controlo (cabeçalho) que é transmitido num canal de controlo (com um comprimento de onda próprio) e é processado no domínio eléctrico.



O sinal de controlo é enviado antes do burst de modo a criar um circuito dinâmico. Quando o burst chega ao comutador, este já está configurado evitando a utilização de buffers ópticos.

A comutação é feita a nível de burst e não de pacotes. Isto permite usar uma matriz de comutação óptica menos rápida do que na comutação de pacotes: tempos de comutação da ordem dos  $\mu$ s, enquanto o segundo caso requeria ns.

A análise do cabeçalho é feita no domínio eléctrico e não no domínio óptico como no caso dos pacotes.



## Conclusões

---

- **As redes ópticas com capacidades de 10 Tb/s por fibra são já uma realidade.**
- **As soluções mais apropriadas para 400 Gb/s e 1 Tb/s por canal ainda não claras, mas é provável que a tecnologia dos supercanais venha a ter um papel importante.**
- **Há ainda um longo caminho a percorrer até que seja possível ter redes ópticas baseadas em comutação de pacotes a nível óptico.**



**Obrigado pela atenção**