

## PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE REDES E SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

### TP 319 – Redes Ópticas, MPLS e GMPLS

© Antônio M. Alberti

#### Tópicos

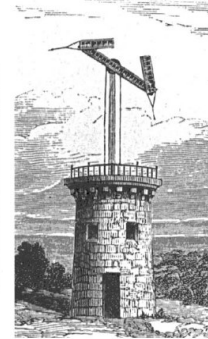
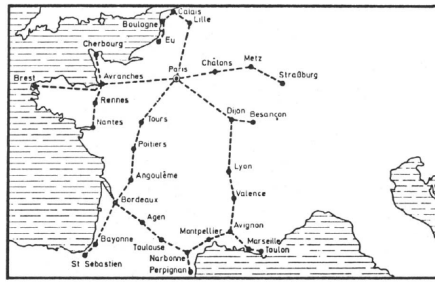
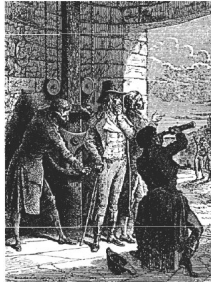
- ✓ Breve Histórico
- ✓ Redes WDM
- ✓ Redes de Roteamento de Comprimento de Onda
- ✓ Redes de Comutação de Pacotes Ópticos
- ✓ Projeto Akari



© Antônio M. Alberti

## Breve Histórico

- ✓ 1830
  - Rede óptica telegráfica na França.



Fonte: Aschoff

Cortesia: Prof. Dr. Werner Rozenkranz

© Antônio M. Alberti

## Breve Histórico

- ✓ 1958
  - Invenção do **L.A.S.E.R.** (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) ou seja, Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação).
- ✓ 1966
  - Proposta de usar fibra de vidro como meio de transmissão da luz. Entretanto, as perdas eram de 1000dB/km!!!
- ✓ 1970
  - Surgimento de lasers semicondutores e diodos emissores de luz na janela de 850 nm. Produção com fibras de baixa perda: 20db/km.



Cortesia: Prof. Dr. Werner Rozenkranz

© Antônio M. Alberti

## Breve Histórico

- ✓ 1970
  - A idéia da comunicação em vários comprimentos de onda (WDM) foi publicada pela primeira vez.
  
- ✓ 1977
  - *General Telephone and Electronics* enviaram a primeira comunicação telefônica através de uma fibra óptica, a 6 Mbps, em *Long Beach*, Califórnia.
  - Primeiro teste de transmissão em fibra óptica feita pela Deutsche Telekom: 34 Mbps, 4.3km, 850nm, Berlin.
  - A primeira geração de sistemas ópticos operou a taxas de até 45 Mbps com distâncias entre repetidores de 10 km.
  
- ✓ 1978
  - Os sistemas WDM foram demonstrados em laboratório.

## Breve Histórico

- ✓ 1981
  - O uso de fibra óptica monomodo se revelou importante para melhorar o desempenho com relação a dispersão.
  
- ✓ 1987
  - Os sistemas de 2ª geração operavam a taxas de até 1.7 Gbps com distâncias entre repetidores de 50 km.
  
- ✓ 1990
  - Os sistemas de 3ª geração operavam a taxas de até 2.5 Gbps com distâncias entre repetidores de 100 km.
  
- Desenvolvimento do amplificador óptico.

## Breve Histórico

- ✓ 1998
  - 1º sistema de comunicação WDM entra em operação na Deutsche Telekom.
  - Os sistemas de 4ª geração operam a taxas de até 14 Tbps com distâncias entre repetidores de 160 km.
  
- ✓ 2007
  - 25.6Tb/s em 240km (160 canais WDM x 2 polarizações x 2·40Gb/s (QPSK) de dados, acrescidos de 7% de proteção FEC) apresentados na OFC2007 em 29.03.2007.

## Tópicos

- ✓ Introdução
- ✓ Padronização
- ✓ Elementos de Rede



Fonte: Freir

## Introdução

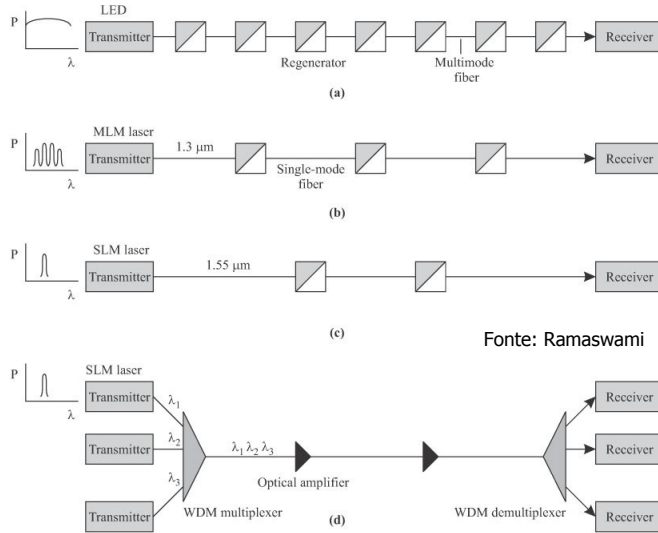
- ✓ *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) é uma tecnologia que permite multiplexar várias **portadoras ópticas** em uma única fibra óptica através do uso de diferentes comprimentos de onda de um laser para carregar diferentes sinais ópticos.
- ✓ WDM é essencialmente a mesma coisa que *Frequency Division Multiplexing* (FDM), que já vem sendo usada em comunicações de rádio por mais de um século.
- ✓ A idéia é transmitir simultaneamente em vários **comprimentos de onda** (ou equivalentemente, cores ou frequências) de uma mesma fibra.

## Introdução

- ✓ É como se existissem “**fibras virtuais**” dentro de uma fibra real.
- ✓ Tanto o **WDM**, como o **TDM**, permitem aumentar a capacidade de transmissão dos sistemas ópticos, e são complementares uns aos outros.
- ✓ Portanto, as redes hoje usam uma combinação de TDM e WDM.
- ✓ Assim, uma questão importante é qual a **combinação** mais adequada destas técnicas para um determinado cenário.

## Introdução

### ✓ Evolução dos Sistemas de Transmissão em Fibra Óptica

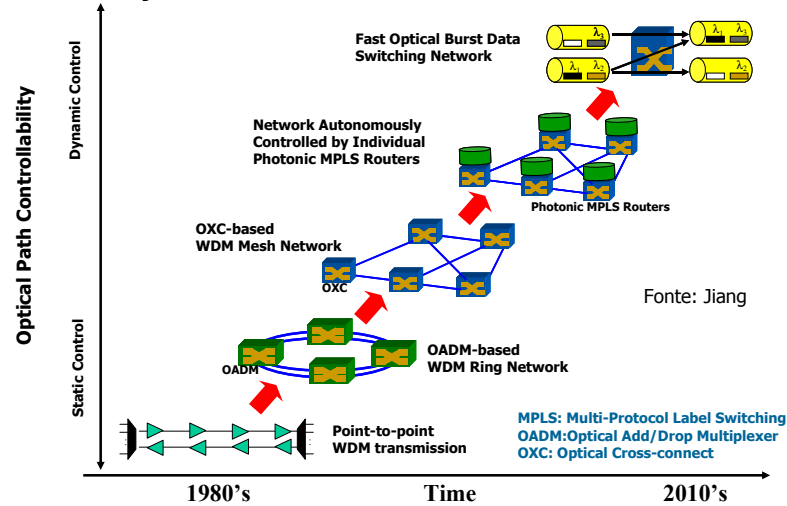


Fonte: Ramaswami

© Antônio M. Alberti

## Introdução

### ✓ Evolução dos Sistemas de Transmissão em Fibra Óptica



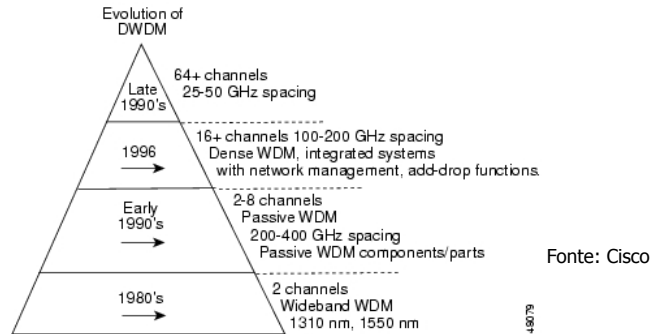
Fonte: Jiang

© Antônio M. Alberti

## Introdução

- ✓ A ideia do WDM foi publicada pela primeira vez em 1970 e em 1978 os sistemas WDM foram demonstrados em laboratório.
- ✓ O primeiro sistema WDM combinou apenas dois sinais em dois comprimentos de onda diferentes.

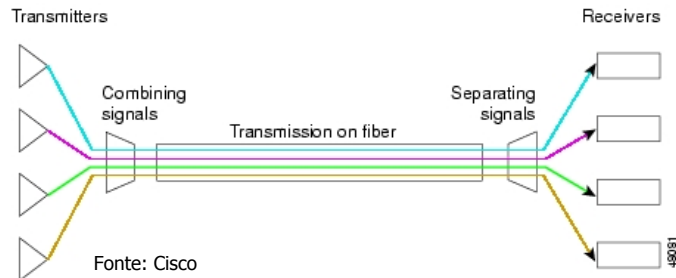
TP 319



## Introdução

- ✓ Os atuais sistemas WDM usam cada comprimento de onda com um canal separado, que pode ser usado para transportar tráfego de comutação de circuitos ou de pacotes, inclusive com taxas de transmissão diferentes.

TP 319



## Introdução

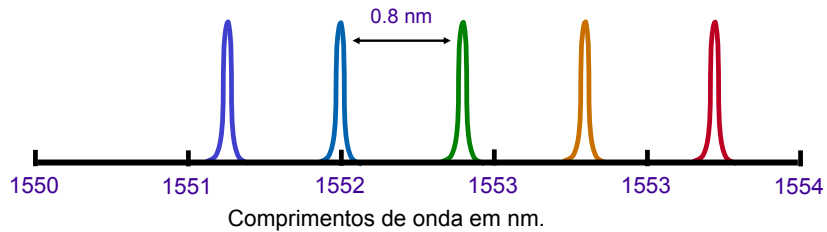
- ✓ O comprimento de onda em sistemas WDM (representado pela letra grega  $\lambda$ ) é medido em unidades de **nanômetros** (nm).
- ✓ Os comprimentos de onda de interesse para comunicação na fibra óptica são centrados em **800**, **1300** e **1550** nm.
- ✓ Os sistemas WDM tipicamente usam as janelas de **1300** e **1550** nm, tirando proveito de tecnologias ópticas avançadas, tais como **lasers sintonizáveis** e **filtros ópticos estreitos**, para operar com vários comprimentos de onda nestas janelas.

## Introdução

- ✓ Entretanto, a preferência é pela janela de 1550 nm, uma vez que esta é janela com **menores perdas intrínsecas** e **maior disponibilidade** de bons **amplificadores ópticos**.
- ✓ Os comprimentos de onda e frequências usados em WDM foram padronizados pelo **ITU-T** na **Recomendação G.692**.
- ✓ Trata-se de uma grade de frequências centradas em **193.1 THz** (1552,52 nm).
- ✓ O ITU-T decidiu introduzir um espaçamento entre cada  $\lambda$  utilizando frequências de **50 GHz**, **100 GHz** ou **200 GHz**.

## Introdução

- ✓ Em nanômetros, estes espaçamentos correspondem a 0,4 nm, 0,8 nm e 1,6 nm, respectivamente.
- ✓ Estes canais residem na Conexão **Banda C**, que vai de 1530,3 nm até 1567,1 nm.



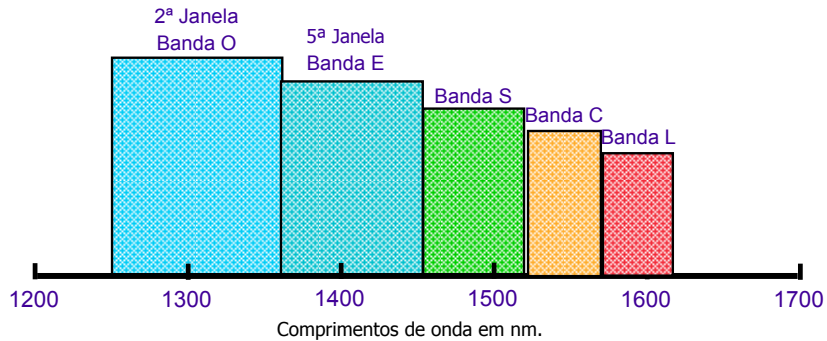
## Introdução

- ✓ As diferentes bandas disponíveis hoje para transmissão em fibras ópticas **monomodo** são:

Band	Description	Wavelength Range
<b>O band</b>	original	1260 to 1360 nm
<b>E band</b>	extended	1360 to 1460 nm
<b>S band</b>	short wavelengths	1460 to 1530 nm
<b>C band</b>	conventional ("erbium window")	1530 to 1565 nm
<b>L band</b>	long wavelengths	1565 to 1625 nm
<b>U band</b>	ultralong wavelengths	1625 to 1675 nm

## Introdução

- ✓ Os primeiros sistemas WDM usaram a **Banda C**, primeiramente porque está é a banda de operação dos **Amplificadores à Fibra Dopada com Érbio (EDFA)**.



© Antônio M. Alberti

## Introdução

- ✓ Atualmente, existem amplificadores EDFAs que operam na **Banda L**, permitindo a construção de sistemas WDM que operem em ambas as bandas.
- ✓ As **Bandas S e U** podem ser usadas com amplificadores de Raman, ou outros tipos de amplificadores.
- ✓ O desenvolvimento de novos tipos de fibras está permitindo o uso da **Banda E**.
- ✓ Com relação ao modo de propagação, muitos sistemas WDM operam em **fibras monomodo**, com diâmetro de núcleo de 9  $\mu\text{m}$ , embora existam sistemas que operem em **fibras multimodo**.

© Antônio M. Alberti

## Introdução

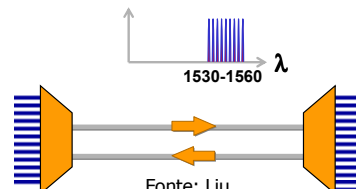
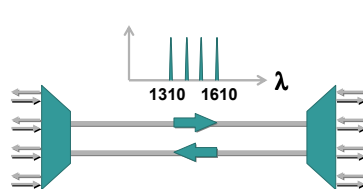
- ✓ Os sistemas WDM pode ainda ser divididos em dois tipos conforme o número de  $\lambda$ s: **esparso** (CWDM) e **denso** (DWDM).
- ✓ CWDM tipicamente tem até 16  $\lambda$ s, enquanto DWDM tem 80 ou mais  $\lambda$ s.
- ✓ Existem ainda sistemas com espaçamento entre canais de 25 GHz ou menores, chamados de **ultra densos**.

## Introdução

- ✓ Comparação dos Sistemas

Fonte: Freir

	Coarse WDM (includes WWDM)	WDM	DWDM (includes ultra dense WDM)
Channel Spacings	Large, from 1.6 nm (200 GHz) to 25 nm	1310 nm lasers used in conjunction with 1550 nm lasers	Small, 200 GHz and less
Number of bands used	O,E,S,C and L	O and C	C and L
Cost per channel	Low	Low	High
Number of channels delivered	17-18 at most	2	Hundreds of channels possible
Best Application	Short-haul, Metro	PON	Long-haul



## Padronização

- ✓ Dentre os principais padrões de WDM estão os do **ITU-T** (Série G), **IEC**, **Telcordia** e **TIA**.
- ✓ Alguns padrões do ITU-T relevantes são:
  - G.661, G.662 e G.663 – Amplificação Óptica.
  - **G.694.1** – Grid de Frequências DWDM.
  - **G.694.2** – Grid de Frequências CWDM.
  - **G.695** – Detalhamento de Sistemas CWDM.
  - G.692, G.709, G.957 e G.959.1 – Outros aspectos

## Padronização

- ✓ Plano de Canais ITU-T (G.694.1 - DWDM)

Espaçamento de Canal	Regra de Construção
12.5 GHz	$193.1 \text{ THz} + n \times 0.0125$
25 GHz	$193.1 \text{ THz} + n \times 0.025$
50 GHz	$193.1 \text{ THz} + n \times 0.05$
100 GHz ou mais	$193.1 \text{ THz} + n \times 0.1$

Onde n é um inteiro positivo e negativo, incluindo zero.

## Padronização

- ✓ Plano de Canais ITU-T para Espaçamento de **0.4 nm** (50 GHz).

Todos os  $\lambda$ s em nm.

Foram definidos 81 canais.

1528.77	1534.64	1540.56	1546.52	1552.52	1558.58
1529.16	1535.04	1540.95	1546.92	1552.93	1558.98
1529.55	1535.43	1541.35	1547.32	1553.33	1559.39
1529.94	1535.82	1541.75	1547.72	1553.73	1559.79
1530.33	1536.22	1542.14	1548.11	1554.13	1560.20
1530.72	1536.61	1542.54	1548.51	1554.54	1560.61
1531.12	1537.00	1542.94	1548.91	1554.94	
1531.51	1537.40	1543.33	1549.32	1555.34	
1531.90	1537.79	1543.73	1549.72	1555.75	
1532.29	1538.19	1544.13	1550.12	1556.15	
1532.68	1538.58	1544.53	1550.52	1556.55	
1533.07	1538.98	1544.92	1550.92	1556.96	
1533.47	1539.37	1545.32	1551.32	1557.36	
1533.86	1539.77	1545.72	1551.72	1557.77	
1534.25	1540.16	1546.12	1552.12	1558.17	

A velocidade da luz considerada é de  $2.99792458 \times 10^8$  m/s

© Antônio M. Alberti

## Padronização

- ✓ Plano de Canais ITU-T para Espaçamento de **0.8 nm** (100 GHz).

Todos os  $\lambda$ s em nm.

1528.77	1534.64	1540.56	1546.52	1552.52	1558.98
1529.55	1535.43	1541.35	1547.32	1553.33	1559.79
1530.33	1536.22	1542.14	1548.11	1554.13	1560.61
1531.12	1537.00	1542.94	1548.91	1554.94	
1531.90	1537.79	1543.73	1549.72	1555.75	
1532.68	1538.58	1544.53	1550.52	1556.55	
1533.47	1539.37	1545.32	1551.32	1557.36	
1534.25	1540.16	1546.12	1552.12	1558.17	

A velocidade da luz considerada é de  $2.99792458 \times 10^8$  m/s

© Antônio M. Alberti

## Padronização

- ✓ Plano de Canais ITU-T (G.694.2 - CWDM)
  - A Recomendação G.694 define um espaçamento de 20 nm entre canais, 18 λs entre 1270 nm e 1610 nm.

ITU CWDM Grid (nm)	1270	1290	1310	1330	1350	1370
	1390	1410	1430	1450	1470	1490
	1510	1530	1550	1570	1590	1610

Fonte: Freir

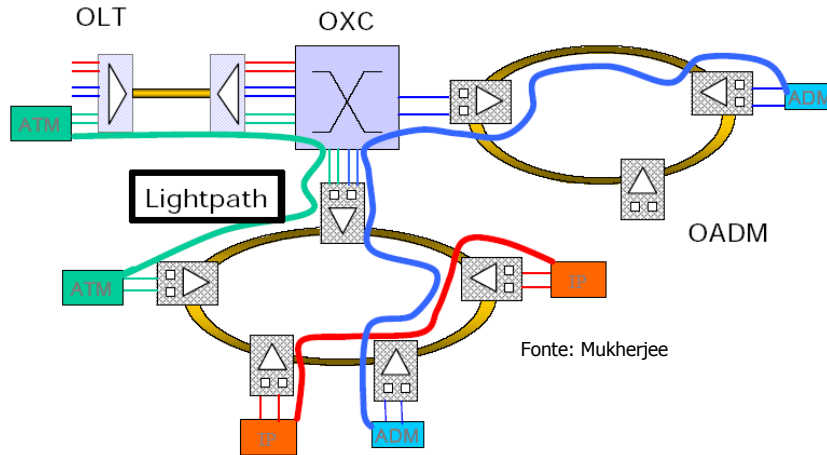
- O espaçamento de 20 nm, corresponde a aproximadamente 2~3 THz, dependendo da janela óptica.

## Elementos de Rede

- ✓ Visão Geral
- ✓ Terminais de Linha Ópticos
- ✓ Amplificadores de Linha Ópticos
- ✓ Multiplexadores Ópticos Add/Drop
- ✓ Crossconnects Ópticos

## Redes Ópticas Redes WDM

### Visão Geral



Fonte: Mukherjee

OLT – Optical Line Terminal ou Terminal de Linha Óptico.

OXC – Optical Crossconnect ou Crossconnect Óptico.

OADM – Optical Add/Drop Multiplexer ou Multiplexador Óptico Add/Drop.

© Antônio M. Alberti

TP 319

## Redes Ópticas Redes WDM

### Visão Geral

- ✓ Um *lightpath* é um canal óptico fim a fim.
- ✓ A arquitetura suporta uma variedade de topologias, incluindo *anel* e *malha*.
- ✓ Os OLTs realizam a multiplexação/demultiplexação de vários comprimentos de onda em uma única fibra óptica.
- ✓ Os OLTs são conectados as bordas das redes, através de enlaces *ponto a ponto*.

© Antônio M. Alberti

TP 319

## Visão Geral

- ✓ Os **OADMs** são usados em localizações nas quais uma parte dos  $\lambda$ s precisa ser descarregada e outra não.
- ✓ Os **OXC**s tem funcionalidade semelhante aos OADMs, mas permite maior escala em termos de número de portas e  $\lambda$ s.
- ✓ Os usuários (ou clientes) desta rede são conectados a OLTs, OADMs e OXC.
- ✓ Os clientes podem ser roteadores IP, comutadores ATM e Gigabit Ethernet, equipamentos SDH/SONET, etc.

## Visão Geral

- ✓ Além dos elementos mostrados, a rede WDM possui ainda **amplificadores ópticos** utilizados para amplificar os sinais luminosos.
- ✓ Os próprios elementos de rede WDM pode incorporar capacidade de amplificação.
- ✓ O número de  $\lambda$ s que pode ser suportado depende das limitações impostas pelos componentes e pela propagação da luz neste ambiente.

## Visão Geral

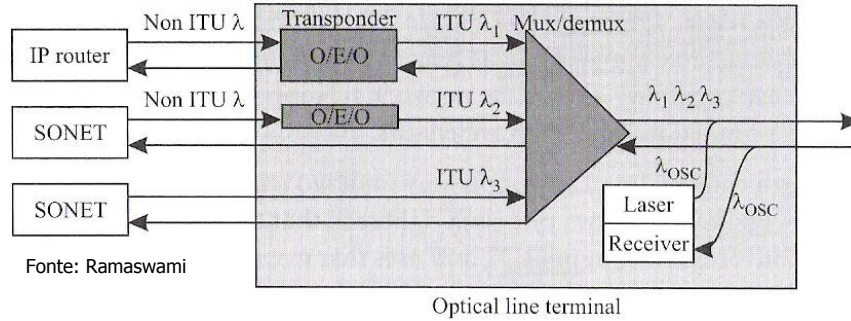
- ✓ Alguns fatores importantes nesta arquitetura são:
  - **Reuso de  $\lambda$**  - Um mesmo comprimento de onda pode ser espacialmente reusado em mais de um *lightpath*, desde que os trajetos não se sobreponham.
  - **Conversão de  $\lambda$**  - Ao longo do trajeto, um *lightpath* pode utilizar diferentes  $\lambda$ s em cada enlace percorrido. A conversão de  $\lambda$ s aumenta a utilização da rede.
  - **Transparência** – Diz respeito a variedade de taxas, protocolos e domínios relacionados a um *lightpath*. Permite a rede óptica transportar grande variedade de tráfego.

## Visão Geral

- **Comutação de Circuitos** – Os *lightpaths* são análogos aos circuitos comutados telefônicos, exceto pelo fato de que sua permanência é muito maior. O termo roteamento em WDM refere-se a determinação do trajeto do *lightpath*.
- **Resiliência** – É a capacidade da rede se recuperar de falhas. Os *lightpaths* podem ser roteados por outros caminhos alternativos automaticamente.

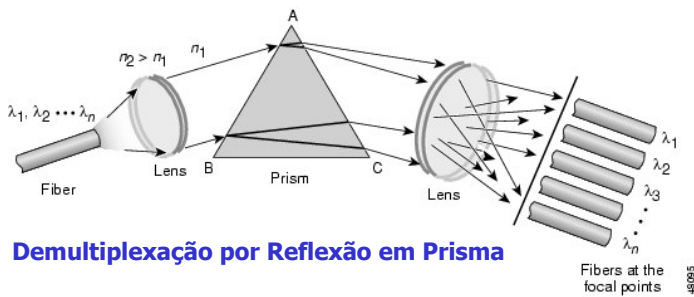
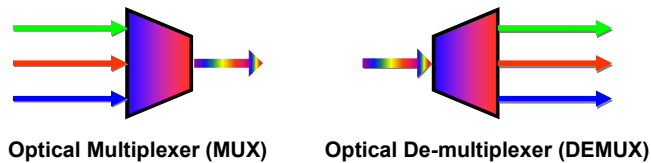
## Terminais de Linha Óptica

- ✓ São usados para **multiplexar/demultiplexar**  $\lambda$ s junto aos equipamentos de pacotes/circuitos dos clientes da rede WDM.



## Terminais de Linha Óptica

- ✓ Para tanto, utilizam **multiplexadores** e **demultiplexadores** ópticos.



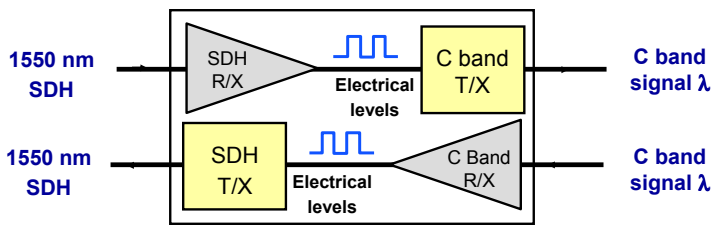
## Terminais de Linha Ópticos

- ✓ Possuem também equipamentos de adaptação de domínio/tecnologias chamados de *transponder*.
- ✓ O *transponder* converte o **espectro espalhado** do cliente em um sinal DWDM **compacto**, e vice-versa.
- ✓ Realizam também a conversão de **domínio elétrico** para **óptico**, e vice-versa.
- ✓ São equipamentos caros pois realizam **resincronização (tempo)**, **reformatação (forma)** e **regeneração (potência)** de sinais (3R).

## Terminais de Linha Ópticos

- ✓ Em geral, carecem de **transparência**.  
*All-optical transponders* são bem-vindos!

Fonte: Freir



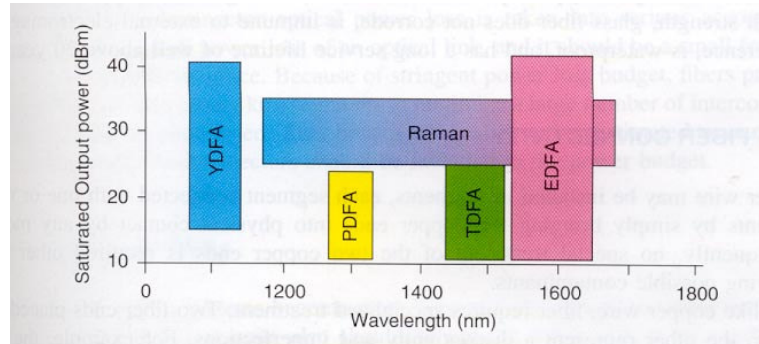
Fonte: Freir



Fonte: Cisco

## Amplificadores de Linha Ópticos

- ✓ São instalados junto aos enlaces ópticos em intervalos periódicos de aproximadamente 80-120 Km.
- ✓ Existe uma grande variedade de tipos de amplificadores:

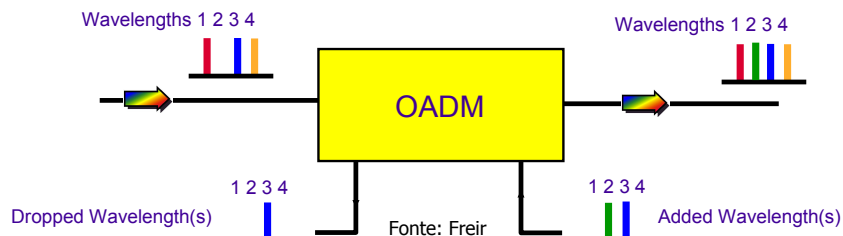
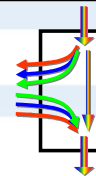


Fonte: Kalyanaraman

© Antonio M. Alberti

## Multiplexadores Ópticos Add/Drop

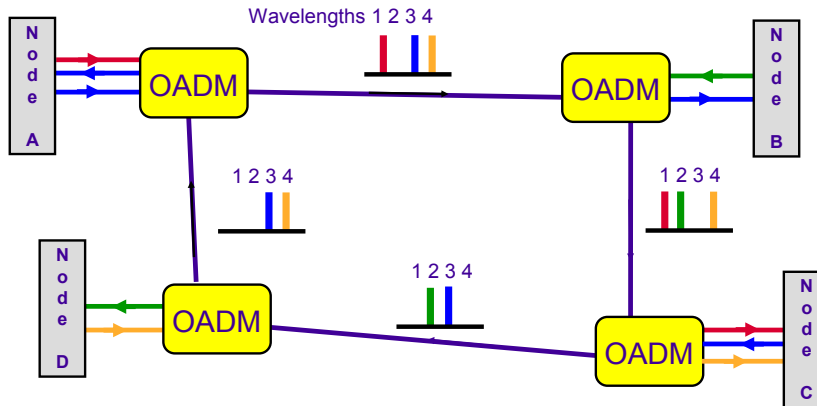
- ✓ Os OADMs são multiplexadores ópticos que permitem inserir/retirar sinais multiplexados em diferentes comprimentos de onda.
- ✓ Um OADM permite acessar sinais sem a necessidade de voltar ao domínio eletrônico.



© Antônio M. Alberti

## Redes Ópticas WDM Multiplexadores Ópticos Add/Drop

OADM: Optical Add-Drop Multiplexer



Observe o reuso do comprimento de onda "azul" (nº 3).

© Antônio M. Alberti

## Redes Ópticas WDM Multiplexadores Ópticos Add/Drop

✓ Os principais atributos de um OADM são:

- N° de  $\lambda$ s – Qual o número total de  $\lambda$ s a ser suportado na rede?
- N° de  $\lambda$ s Carregados/Descarregados – Qual o número máximo de  $\lambda$ s a ser carregado/descarregado em um determinado OADM?
- Limitações de Carga/Descarga – Existe alguma limitação na carga/descarga de algum  $\lambda$  específico? Algumas arquiteturas não permitem que qualquer  $\lambda$  seja acessado.
- Facilidade de Carga/Descarga de Canais Adicionais – Os  $\lambda$ s já em uso, são afetados?

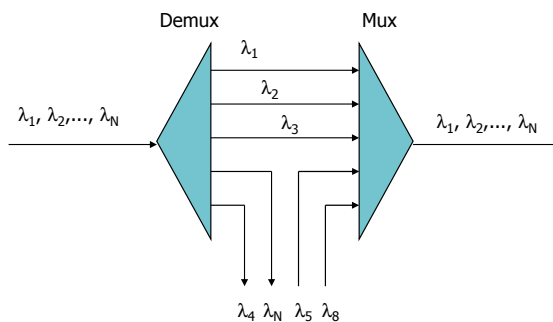
© Antônio M. Alberti

## Multiplexadores Ópticos Add/Drop

- **Modularidade no N° de  $\lambda$ s** – É possível habilitar mais  $\lambda$ s caso haja um crescimento na demanda? Como se comporta o custo?
- **Existem Impactos na Transmissão dos  $\lambda$ s** – O OADM causa impactos (danos) nos parâmetros de transmissão da luz nos diversos  $\lambda$ s? Qual o efeito sob os  $\lambda$ s que não desembarcam?
- **Facilidade de Configuração** – A configuração dos  $\lambda$ s passantes, carregados e descarregados pode ser feita via *software* remotamente?

## Multiplexadores Ópticos Add/Drop

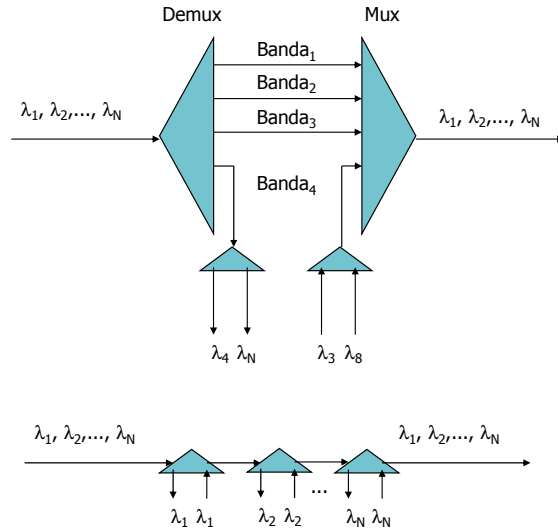
- ✓ Várias **arquiteturas** tem sido propostas para construir OADMs, usando diferentes arranjos de um ou mais multiplexadores/filtros.



**Arquitetura Paralela:**  
Todos os  $\lambda$ s são separados e multiplexados novamente.

Redes Ópticas  
Redes WDM

## Multiplexadores Ópticos Add/Drop



**Arquitetura Paralela Modular:** Somente um conjunto de  $\lambda$ s é separado (Banda 4) e multiplexado novamente.

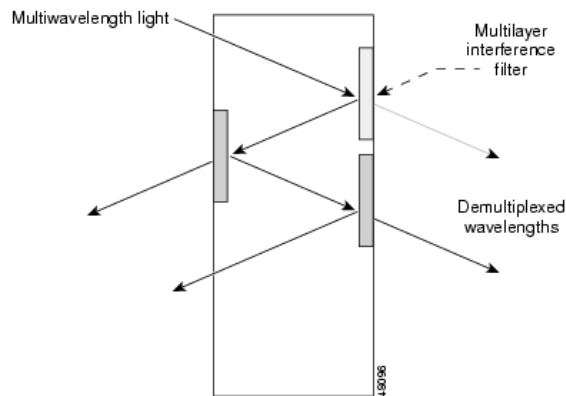
**Arquitetura Serial:** Somente  $\lambda$ s são descarregados e carregados um por vez.

TP 319

Redes Ópticas  
Redes WDM

## Multiplexadores Ópticos Add/Drop

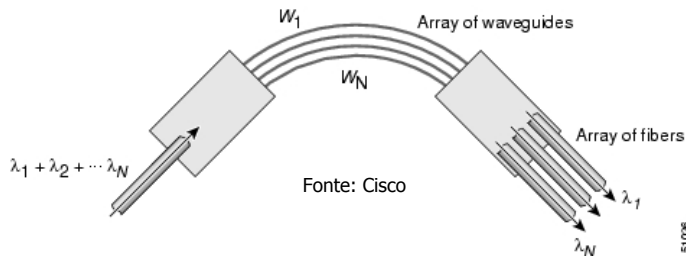
- ✓ Nestes OADMs são usados diversos tipos de filtros, tais como **Grades de Bragg**, **Dielétricos de Filme Fino**, **Grades de Arranjo de Guias de Onda**.



**Filtros de Interferência Multicamada:** São construídos com filmes finos, no caminho óptico, de tal forma que cada filtro deixa passar um  $\lambda$  e reflete os demais.

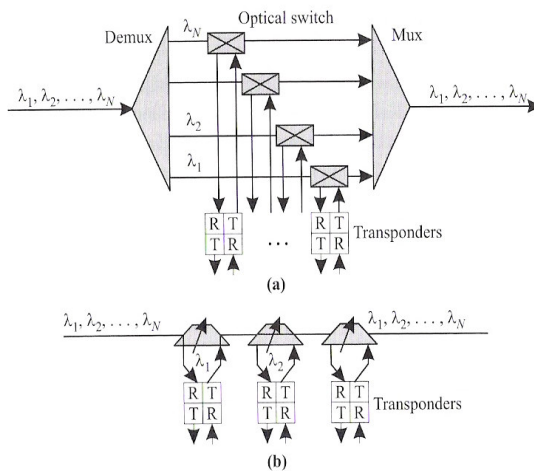
TP 319

## Multiplexadores Ópticos Add/Drop



**Grades de Arranjo de Guias de Onda:** Ou *Arrayed Waveguide Gratings (AWGs)*, consistem de um arranjo de guias de onda curvados com uma diferença fixa de comprimento entre canais adjacentes. O arranjo causa atrasos de fase, produzindo interferências máximas em saídas diferentes.

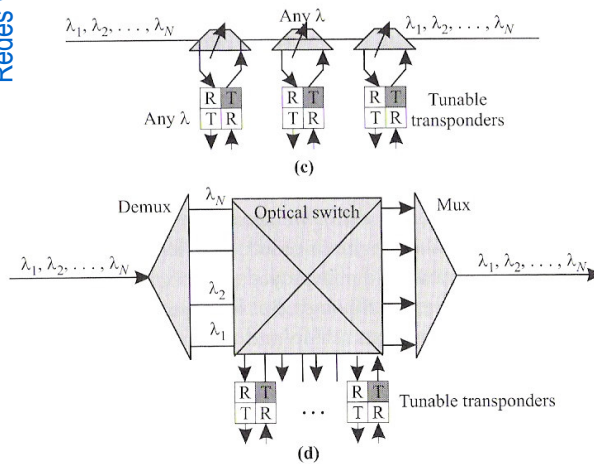
## Multiplexadores Ópticos Add/Drop



**(a) OADM Parcialmente Sintonizável:** Utiliza arquitetura **paralela** com transponders fixados em um  $\lambda$  específico.

**(b) OADM Parcialmente Sintonizável:** Utiliza arquitetura **serial** com transponders fixados em um  $\lambda$  específico.

## Multiplexadores Ópticos Add/Drop

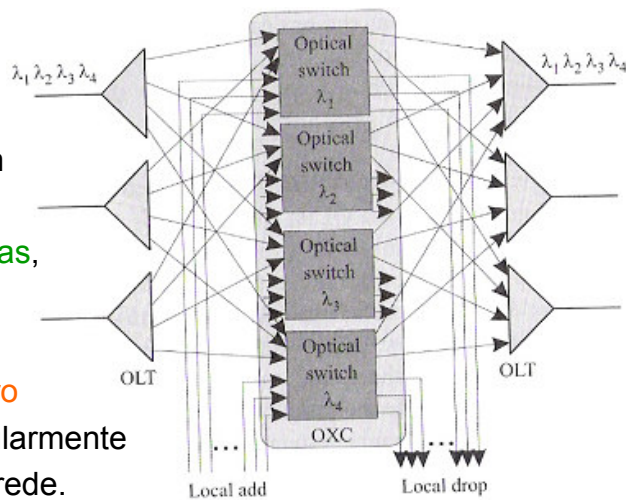


Fonte: Ramaswami

© Antônio M. Alberti

## Crossconnects Ópticos

- Os OXCs são usualmente necessários em redes com topologias mais complexas, tal como uma malha, e com grande número de  $\lambda$ s, particularmente no núcleo da rede.



Fonte: Ramaswami

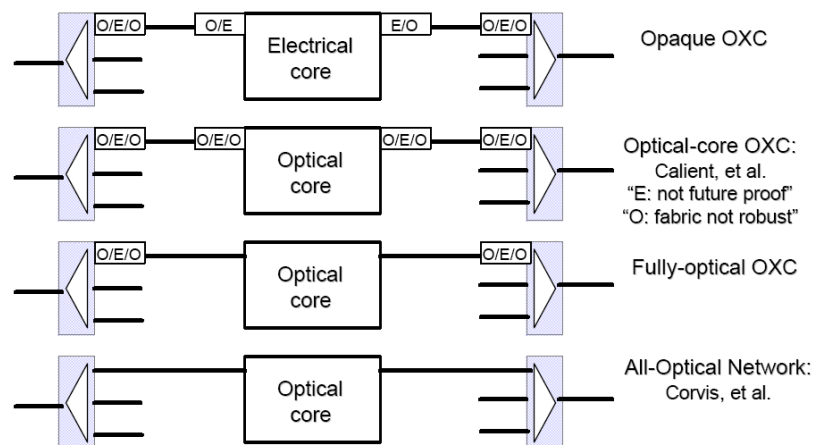
© Antônio M. Alberti

## Crossconnects Ópticos

- ✓ Os OXCs provêm várias funções chaves em grande redes ópticas:
  - **Provisionamento de Serviço** – Pode prover *lightpaths* de forma automática e dinâmica.
  - **Proteção** – Oferece proteção aos *lightpaths*.
  - **Transparência** – Um OXC pode comutar sinais de taxas e formatos arbitrários.
  - **Gerência** – Permite monitorar o desempenho, testar acessos e canais, além da localização de falhas.
  - **Multiplexação e Acomodação de Tráfego** – Permite multiplexar tráfego de diversos clientes e acomodar o tráfego nos *lightpaths* da melhor forma possível, permitindo inclusive a reacomodação de tráfego (*grooming*).

## Crossconnects Ópticos

- ✓ **Evolução dos OXCs**

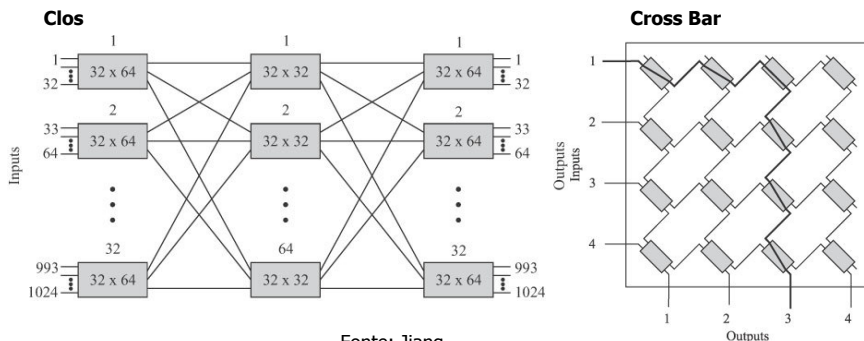


## Crossconnects Ópticos

- ✓ Dentre os principais **parâmetros** de um OXC estão:
  - **Perda de Inserção** – Fração de potência perdida no OXC.
  - **Perdas Diferentes em Saídas Diferentes** – Larga faixa dinâmica, frequentemente necessitando de equalização.
  - **Crossover** – *Crossovers* de guias de onda introduzem perda de potência e interferência entre canais.
  - **Monitoramento de Confiabilidade** – Verificação da confiabilidade de canais e outros.
  - **Bloqueio** – Qualquer porta de entrada não usada pode ser conectada a qualquer porta de saída não usada?

## Crossconnects Ópticos

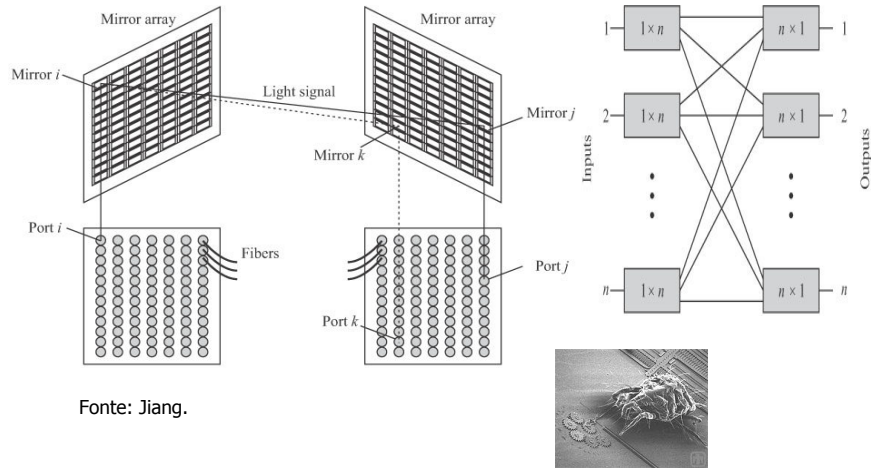
- ✓ Dentre as principais **arquiteturas de comutação** óptica usadas nos OXCs tem-se:
  - **Cross Bar, Clos, Spanke, Benes, Spanke-Benes, MEMS, Banyan**



Fonte: Jiang.

## Crossconnects Ópticos com Arranjos de Espelhos

- ✓ Utiliza **MEMS** – *Micro-electro-mechanical systems*.



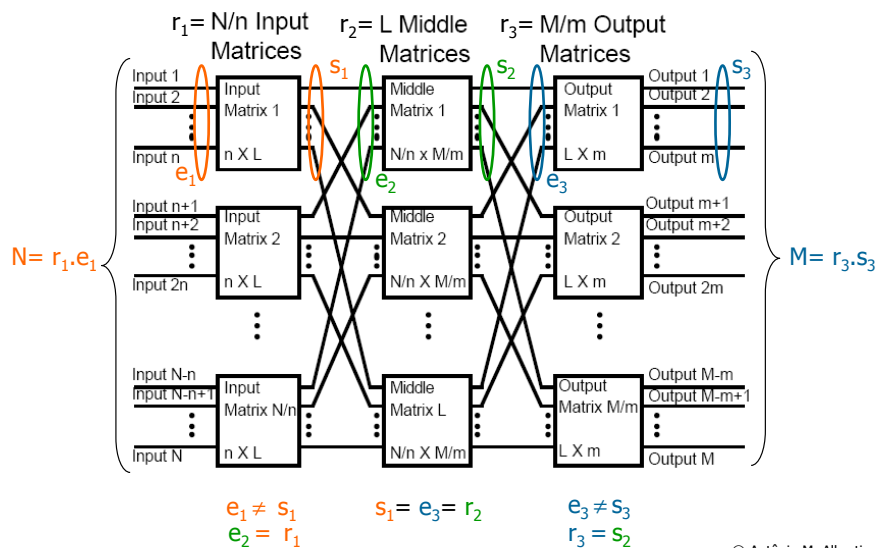
## Crossconnects Ópticos de Múltiplos Estágios

- ✓ Um comutador de múltiplos estágios é construído **interconectado-se** pequenas matrizes de comutação até formar um comutador de grande porte com um número **ímpar** de estágios.
- ✓ Para comutadores de três estágios, as **portas de entrada** são divididas entre várias matrizes de comutação de entrada.

## Crossconnects Ópticos de Múltiplos Estágios

- ✓ As saídas das **matrizes de entrada** alimentam várias matrizes de um único estágio intermediário.
- ✓ As saídas das **matrizes intermediárias** alimentam as entradas de várias matrizes do estágio de saída.
- ✓ Cada **matriz de saída** alimenta um determinado número de **portas de saídas**.
- ✓ Por fim, cada saída de uma **matriz intermediária** é ligada a somente uma **matriz de saída**.

## Crossconnects Ópticos de Múltiplos Estágios



## Crossconnects Ópticos de Múltiplos Estágios

- ✓ **Comutadores Estritamente sem Bloqueio**
  - Um comutador é dito estritamente sem bloqueio se uma Conexão pode ser estabelecida entre qualquer entrada e saída vagas, sem a necessidade de rearranjar as chamadas existentes.
  
- ✓ **Teorema de Clos**
  - Um comutador de três estágios interconectados é **estritamente sem bloqueio** se e somente se o número de matrizes do segundo estágio ( $r_2$ ) for igual ao número de entradas de cada matriz do primeiro estágio ( $e_1$ ) mais o número de saídas de cada matriz do terceiro estágio ( $s_3$ ) menos 1. Ou seja:

$$r_2 = e_1 + s_3 - 1$$

© Antônio M. Alberti

## Crossconnects Ópticos de Múltiplos Estágios

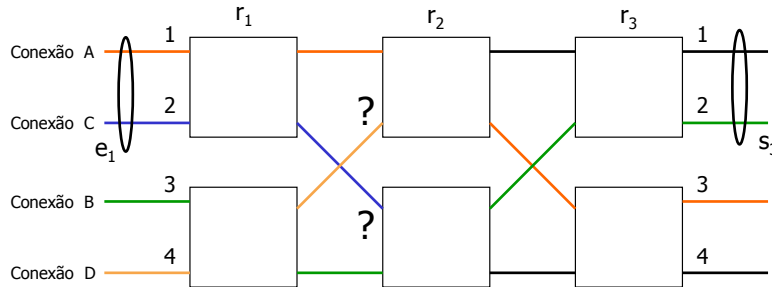
- ✓ **Prova**
  - Para provar este teorema, vamos considerar a seguinte situação:
    - Um comutador com quatro portas de entrada ( $N = 4$ ) e duas matrizes de entrada ( $r_1 = 2$ ). Logo  $e_1 = 2$ .
    - Um comutador com quatro portas de saída ( $M = 4$ ) e duas matrizes de saída ( $r_3 = 2$ ). Logo  $s_3 = 2$ .
    - Já existem duas conexões sendo atendidas no comutador:
      - **Conexão A:** Entrada: Porta 1. Saída: Porta 3.
      - **Conexão B:** Entrada: Porta 3. Saída: Porta 2.
  - Qual é quantidade de matrizes intermediárias ( $r_2$ ) para que as conexões abaixo não sejam bloqueadas?
    - **Conexão C:** Entrada: Porta 2. Saída: Porta 1.
    - **Conexão D:** Entrada: Porta 4. Saída: Porta 4.

© Antônio M. Alberti

## Crossconnects Ópticos de Múltiplos Estágios

✓ Prova (cont.)

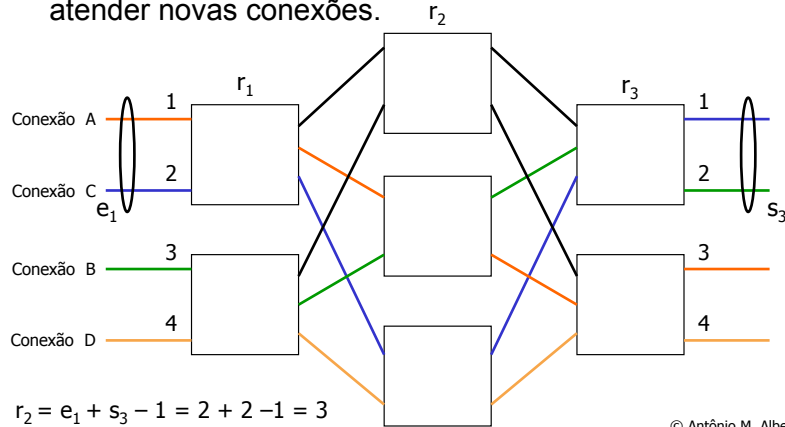
- As conexões C e D são bloqueadas.



## Crossconnects Ópticos de Múltiplos Estágios

✓ Prova (cont.)

- As conexões C e D são atendidas. Cios demonstrou que em sua arquitetura sempre existe uma matriz vaga para atender novas conexões.



## Crossconnects Ópticos de Múltiplos Estágios

### ✓ Número de Crosspoints Necessários

- O número total de *crosspoints* para uma dada arquitetura é igual a:

$$X = (2e_1 - 1).N.\left(2 + \frac{N}{e_1^2}\right)$$

- O número mínimo de *crosspoints* que pode ser obtido para um comutador com N portas de entrada é igual a:

$$X_{\min} = 4.N.(\sqrt{2.N} - 1)$$

## Crossconnects Ópticos de Múltiplos Estágios

### ✓ Cálculo da Probabilidade de Bloqueio

- Uma forma de calcular a probabilidade de bloqueio de Conexão é usando o método de **Jacobeus**.
- Suponha que estejamos interessados em estabelecer um caminho entre alguma porta I do primeiro estágio até alguma porta O do terceiro estágio.
- Chamaremos de  $\{x,y\}$  um estado do comutador onde x portas do primeiro estágio e y portas do terceiro estágio já estão ocupadas.

## Crossconnects Ópticos de Múltiplos Estágios

### ✓ Cálculo da Probabilidade de Bloqueio

- Chamaremos de  $B_{x,y}$  a **probabilidade de bloqueio interna** para o estado  $\{x,y\}$ :

$$\begin{cases} B_{x,y} = 0 & \text{quando } x + y < r_2 \\ B_{x,y} = \frac{x! y!}{r_2! (x + y - r_2)!} & \text{quando } x + y \geq r_2 \end{cases}$$

- Este resultado pode ser expandido para obter-se a **probabilidade interna global de bloqueio média**:

$$B_i = \sum_{x,y} P(x,y) B_{x,y}$$

## Crossconnects Ópticos de Múltiplos Estágios

### ✓ Cálculo da Probabilidade de Bloqueio

- A partir dos resultados de Walker, tem-se:

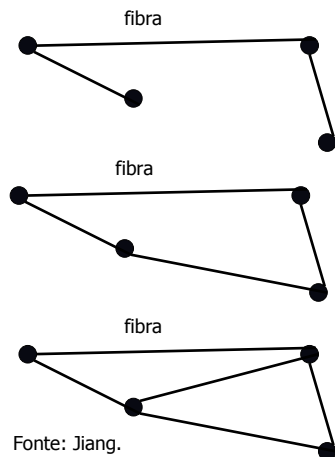
$$B_i = e_1! s_3! \frac{a^{r_2}}{r_2!} \frac{\lfloor (2-a)^{(e_1+s_3-r_2)} \rfloor - \lfloor 2-a^{(e_1+s_3-r_2)} \rfloor}{(e_1 + s_3 - r_2)!}$$

## Redes de Roteamento de Comprimento de Onda

- ✓ Topologia Física
- ✓ Topologia Virtual
- ✓ Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda
- ✓ Conversão de Comprimentos de Onda
- ✓ Exemplo de projeto de Rede em Anel
- ✓ Metodologia Geral de Projeto

## Topologia Física

- ✓ É a topologia sobre a qual os *lightpaths* são criados.



Topologia Linear

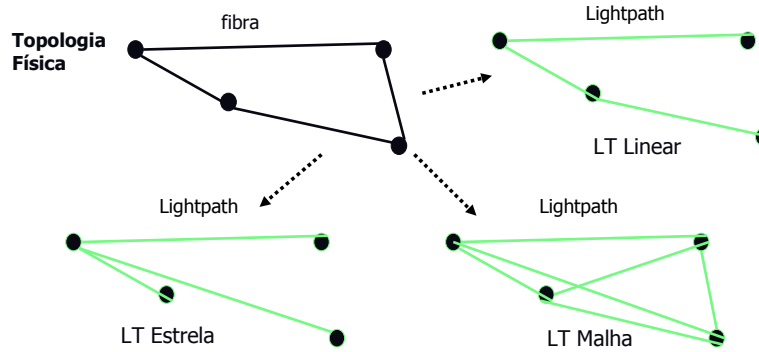
Topologia em Anel

Topologia em Malha

Fonte: Jiang.

## Topologia Virtual

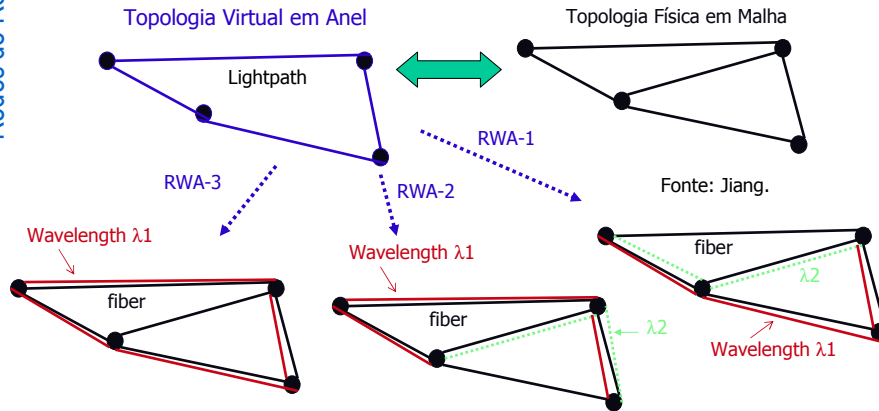
- ✓ É a topologia criada pelos *lightpaths* sobre a rede física. Também é Conexão de *Lightpath Topology* ou LT.



Fonte: Jiang.

## Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda

- ✓ É a realização da topologia virtual sobre a topologia física, através da **determinação** da **rota** de cada *lightpath* e da **alocação** de um  $\lambda$  em cada enlace do seu trajeto.

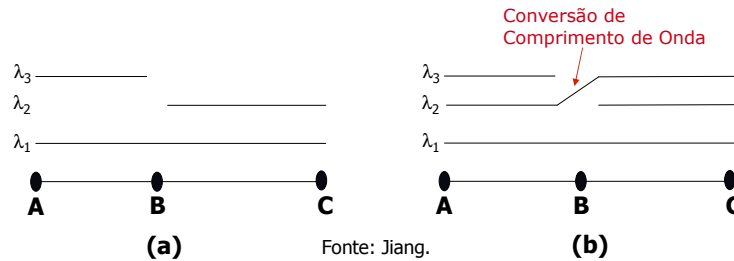


Fonte: Jiang.

RWA - Routing and Wavelength Assignment

## Conversão de Comprimentos de Onda

- ✓ Permite **maximizar** a **utilização** dos  $\lambda$ s na rede, podendo servir como um **transponder** entre diferentes redes.



- (a) Nó B não converte  $\lambda$  e um novo *lightpath* não pode ser estabelecido entre A e C.
- (b) Nó B converte  $\lambda$  e um novo *lightpath* pode ser estabelecido entre A e C.

## Conversão de Comprimentos de Onda

- ✓ Os **conversores de  $\lambda$**  podem ter:
  - **Entrada Fixa e Saída Fixa:** Sempre recebe o sinal em um  $\lambda$  específico de entrada e converte para um  $\lambda$  específico de saída;
  - **Entrada Variável e Saída Fixa:** Recebe uma variedade de  $\lambda$ s na entrada e sempre converte para um  $\lambda$  de saída específico;
  - **Entrada Fixa e Saída Variável:** Recebe em um  $\lambda$  específico e converte para uma variedade de  $\lambda$ s de saída;
  - **Entrada Variável e Saída Variável:** Recebe uma variedade de  $\lambda$ s e converte para uma variedade de  $\lambda$ s de saída;

## Conversão de Comprimentos de Onda

- ✓ Dentre as principais **características desejáveis** de um conversor de  $\lambda$ s tem-se:
  - **Transparência** com relação à taxas de *bits* e formatos;
  - **Tempo rápido** de resposta;
  - Conversão tanto para  $\lambda$ s **curtos** e **longos**;
  - Possibilidade do  $\lambda$  de entrada ser o mesmo de saída;
  - Implementação simples;
  - Níveis de potência de entrada moderada;

## Conversão de Comprimentos de Onda

- ✓ Alguns **tipos de conversores** de  $\lambda$ s são:
  - Conversores **opto-eletrônicos**;
  - Conversores baseados em **efeitos não-lineares** durante a mistura de ondas. Ex. *Four Wave Mixing*;
  - Conversores baseados em **amplificadores ópticos semicondutores** (SOA);
  - Conversores interferométricos;
  - Conversores baseado em grades;

## Exemplo de Projeto de Rede em Anel

- ✓ Objetivo: **avaliar** a relação equipamentos **ópticos** x **enlace/rede**.
- ✓ A medida de custo dos equipamentos de enlace/rede é feita em termos do **número de portas ( $Q$ )**, que equivale ao dobro do número de *lightpaths*, uma vez que cada *lightpaths* possui duas pontas.
- ✓ Na camada óptica, uma importante medida de custo é o número de *transponders* necessários nos OADMs e OXCs. Neste caso, também, o número de *transponders* é igual ao dobro do número de *lightpaths*.

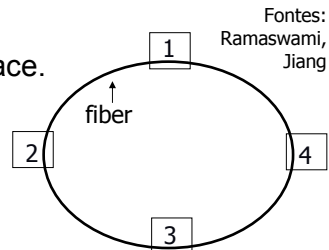
## Exemplo de Projeto de Rede em Anel

- ✓ O restante do custo dos equipamentos da camada óptica é capturado pelo **número de  $\lambda$ s** usados em um enlace ( **$W$** ).
- ✓ Consideraremos uma **matriz de tráfego** onde  **$t$**  unidades de tráfego estão para ser roteados de um roteador IP de origem para todos os outros roteadores IP da rede (**tráfego uniforme**).
- ✓ Nesta análise, supõem-se que a rede **não tem** capacidade de conversão de  $\lambda$ s. E mais, nenhum *lightpath* atravessando o mesmo enlace pode usar o mesmo  $\lambda$ .

## Exemplo de Projeto de Rede em Anel

- ✓ **Parâmetros:**
  - **$N$**  : número de roteadores.
  - **$t$**  : unidades de tráfego a serem roteadas de um roteador até todos os outros.
  - **$L$**  : carga de tráfego em cada enlace em *lightpaths*.
- ✓ **Métricas de Desempenho:**
  - **$Q$**  : número de portas do roteador.
  - **$W$**  : número mínimo de  $\lambda$ s por enlace.

**Topologia Física:**  
4 roteadores conectados por fibras em um anel físico ( $N=4$ ).

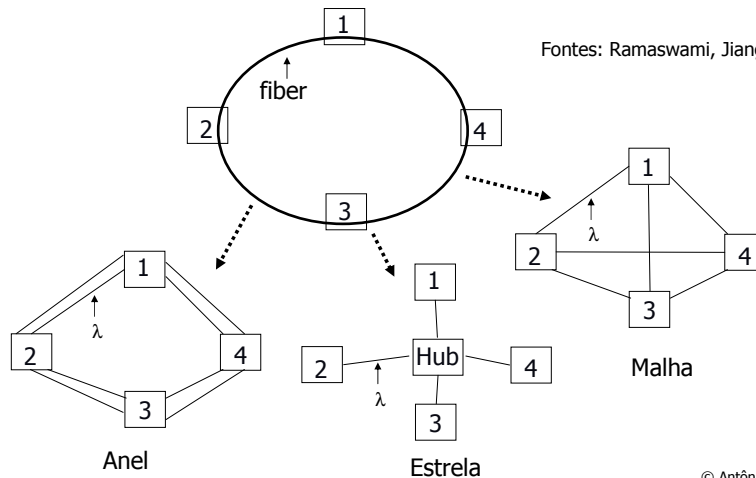


Fontes:  
Ramaswami,  
Jiang

© Antônio M. Alberti

## Exemplo de Projeto de Rede em Anel

- ✓ Existem pelo menos três **topologias virtuais** possíveis para esta rede: **anel**, **estrela** e **malha**.

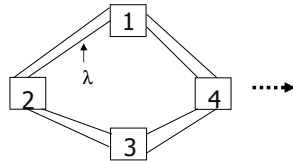


Fontes: Ramaswami, Jiang.

© Antônio M. Alberti

## Exemplo de Projeto de Rede em Anel

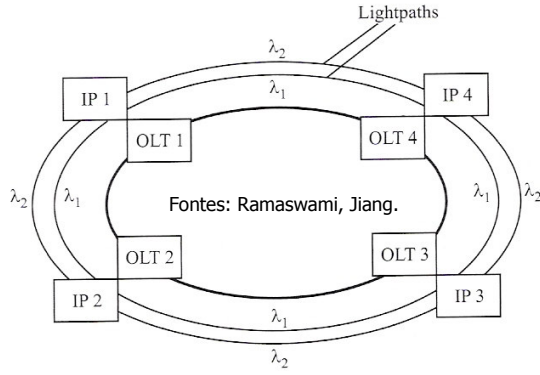
- ✓ Realização da topologia virtual **anel** na topologia física **anel**.



$$L = \frac{N+1 + \frac{1}{N-1} * t}{8}$$

$$W = \lceil L \rceil$$

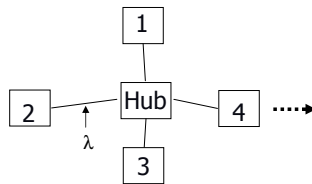
$$Q = 2 * W$$



**Resultado para t = 3:**  
W=2 e Q=4.

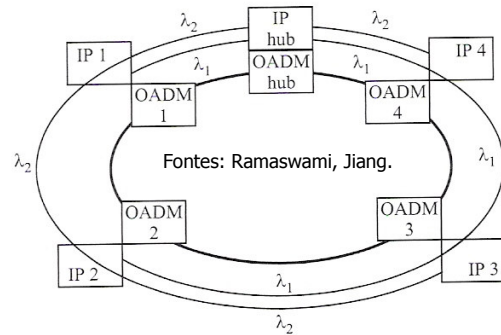
## Exemplo de Projeto de Rede em Anel

- ✓ Realização da topologia virtual **estrela** na topologia física **anel**.



$$Q = 2 * \lceil t \rceil$$

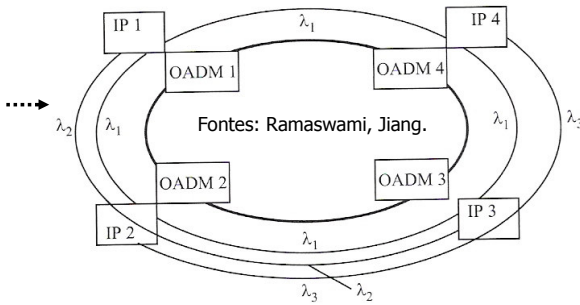
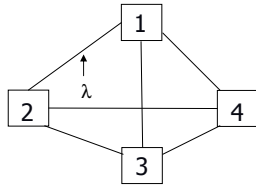
$$W = \frac{N}{2} * \lceil t \rceil$$



**Resultado para t = 1:**  
W=2 e Q=2.

## Exemplo de Projeto de Rede em Anel

- ✓ Realização da topologia virtual **malha** na topologia física **anel**.



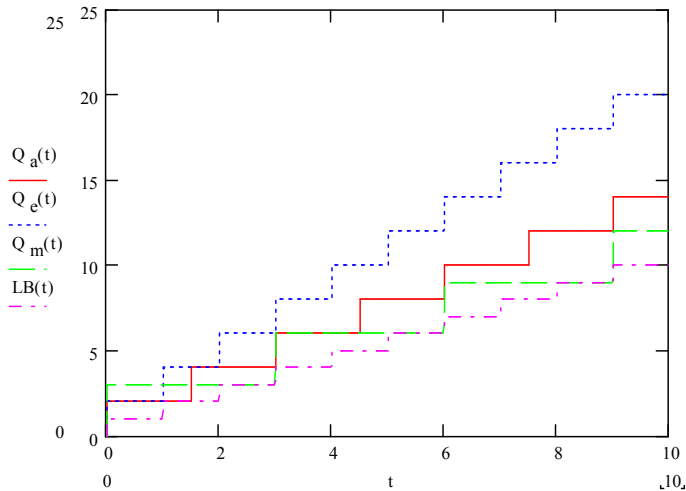
$$Q = (N - 1) * \left\lceil \frac{t}{N - 1} \right\rceil$$

$$W = \left\lceil \frac{t}{N - 1} \right\rceil * \left( \frac{N^2}{8} + \frac{N}{4} \right)$$

**Resultado para t = 3:**  
W=3 e Q=3.

## Exemplo de Projeto de Rede em Anel

- ✓ Número de portas (Q) necessárias para N=4 nós.

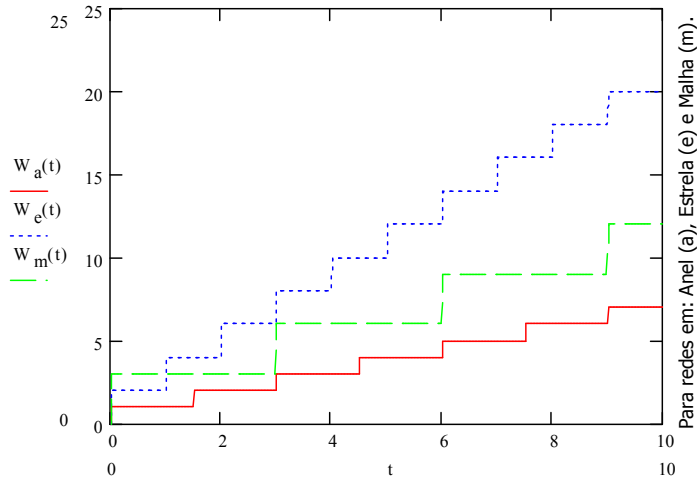


Para redes em: Anel (a), Estrela (e) e Malha (m).

TP 319  
Redes Ópticas  
Redes de Roteamento de  $\lambda$

## Exemplo de Projeto de Rede em Anel

- ✓ Número de  $\lambda$ s ( $W$ ) necessários para  $N=4$  nós.

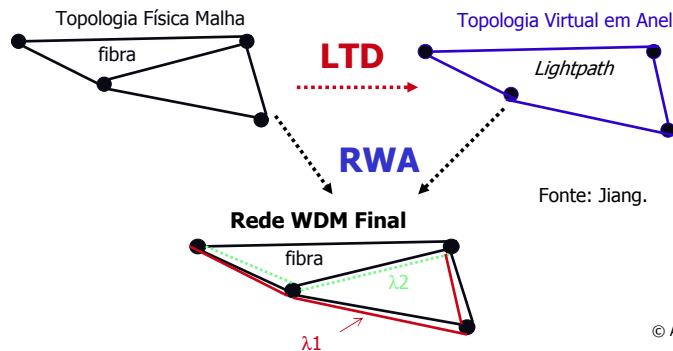


© Antônio M. Alberti

TP 319  
Redes Ópticas  
Redes de Roteamento de  $\lambda$

## Metodologia Geral de Projeto

- ✓ Projeto de Redes WDM  $\Rightarrow$  LTD + RWA
  - LTD: *Lightpath Topology Design* (ou Projeto da Topologia Virtual)
  - RWA: *Routing and Wavelength Assignment* (ou Roteamento e Alocação de  $\lambda$ s)



Fonte: Jiang.

© Antônio M. Alberti

## Redes de Pacotes Ópticos

- ✓ *Photonic Packet Switching* (PPS) ou **Comutação de Pacotes Fotônicos** (ou Ópticos) significa fazer a comutação de pacotes no domínio óptico.
- ✓ O objetivo é prover as mesmas capacidades de comutação do domínio eletrônico, só que no domínio óptico e em velocidades mais altas.
- ✓ Devido a **restrições tecnológicas** é muito difícil realizar o roteamento, multiplexação, comutação, armazenamento e sincronização no domínio óptico.
- ✓ Entretanto, a tecnologia PPS detém o **potencial** de ampliar em várias ordens de grandeza a capacidade de comutação eletrônica, chegando a **Pbps**.

## Redes de Pacotes Ópticos

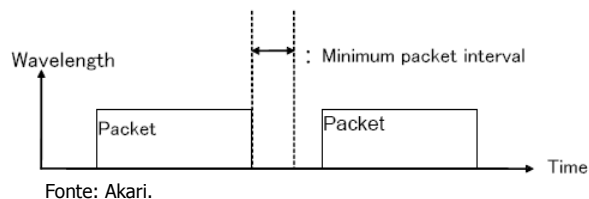
- ✓ A PPS utiliza a técnica **OTDM – Optical Time Division Multiplexing**, que é idêntica a técnica TDM nas redes de pacotes eletrônicos, mas no domínio óptico, e com capacidade típica na ordem de 100 Gbps.
- ✓ De acordo com Nascimento, “no método OTDM, os pacotes ópticos são **chaveados** em cada nó de acordo com o endereço de encaminhamento, carregado por cada pacote.
- ✓ Os pacotes ópticos são separados por pulsos que delimitam as fronteiras entre cada pacote”.

## Redes de Pacotes Ópticos

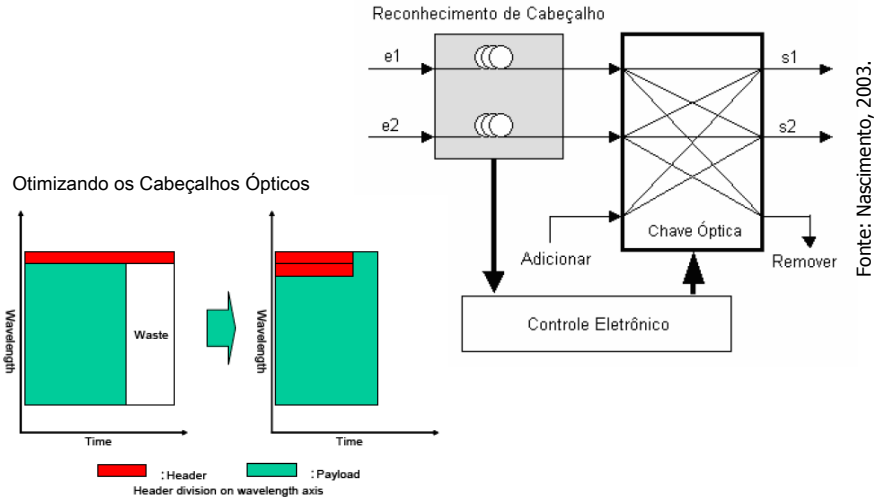
- ✓ A PPS precisa de mecanismos de **sincronização de trens de pulsos** no **tempo** e no **domínio óptico**. Esta sincronização pode ser entre trens de pulsos entrantes.
- ✓ Para tanto, são utilizados **atrasos sintonizáveis**.
- ✓ Porém, resta ainda o problema de se determinar a **fase** entre dois trens de pulsos. Para este problema são usados os PLLs Ópticos ou *Optical Phase Lock Loops*.

## Redes de Pacotes Ópticos

- ✓ Outro aspecto importante é o **Processamento de Cabeçalhos**, que pode ser feito tanto eletronicamente, quanto opticamente.
- ✓ Hoje em dia, se faz somente o **processamento eletrônico dos cabeçalhos**. Uma técnica comum é transmitir o cabeçalho a uma taxa muito menor que o resto do pacote, de tal forma que este seja processado facilmente pelo nó e em tempo hábil. É necessário ainda um intervalo de tempo entre pacotes.



## Redes de Pacotes Ópticos



Fonte: Nascimento, 2003.

© Antônio M. Alberti

## Redes de Pacotes Ópticos

- ✓ Outro problema que limita o avanço das PSSs é o **Armazenamento de Pacotes Ópticos**, uma vez que não existe um dispositivo simples e barato como os eletrônicos.

© Antônio M. Alberti

**Inatel**  
Instituto Nacional de Telecomunicações

**Redes Ópticas**

**Projeto Akari**  
✓ **Visão Geral**

**TP 319**

1 **Optical Grid Infrastructure**

high-performance distributed processing systems (e-business, e-science applications)

optical path SW

2 **New Generation Network Core Architecture**

wavelength sharing

optical packet SW

3 **Universal Access**

sensor/tag

<http://www.nict.go.jp/news/pdf-box/NGNRC-E-0701.pdf> © Antônio M. Alberti

**Inatel**  
Instituto Nacional de Telecomunicações

**Redes Ópticas**

**Projeto Akari**  
✓ **Visão Geral**

(Until 2015, NICT will develop highly reliable large-scale, high-speed optical networks that everyone can use comfortably)

**TP 319**

Space-time standard infrastructure

Opto-quantum technology

Large-scale optical label processing (Photonic network technology)

Pico-second optical switch

Optical buffer

Petabit-per-second-class network architecture

Optical multiple access circuit

Ultra-low power optical node

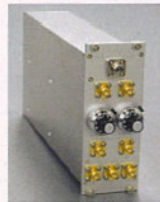
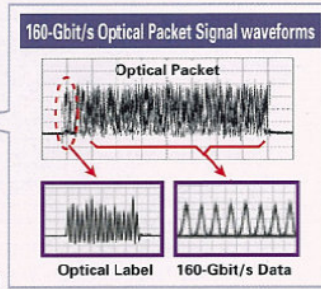
<http://www.nict.go.jp/news/pdf-box/NGNRC-E-0701.pdf> © Antônio M. Alberti

## Projeto Akari

### ✓ Visão Geral



World's first prototype of Optical packet switching system with 160-Gbit/s I/O speed



<Optical Packet Receiver >

Developed in cooperation with NTT Electronics Co.,Ltd.



<Packet Error Measurement System ranging up to 40 Gbit/s >

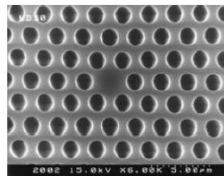
Developed in cooperation with Anritsu Co.,Ltd.

<http://www.nict.go.jp/news/pdf/box/INGNRC-E-0701.pdf>

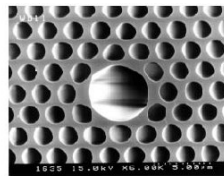
## Projeto Akari

### ✓ Tecnologias Chaves

- Um experimento de transmissão com 1000  $\lambda$ s usando 2,7 Gbps por  $\lambda$  com espaçamento de 6,25 GHz já foi realizado. O uso de tecnologia Conexão **Supercontinuum** permitirá a construção de sistemas com 10000  $\lambda$ s.
- Uso de novos tipos de fibras: a) **Photonic Crystal Fiber** (PCF) e b) **Photonic Band Gap Fiber** (PBF) para melhorar a comunicação WDM.



(a)



(b)

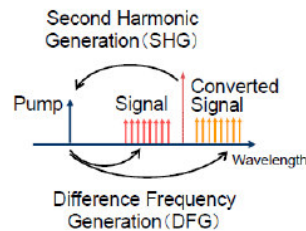
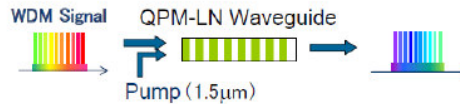
Fonte: Akari.

© Antônio M. Alberti

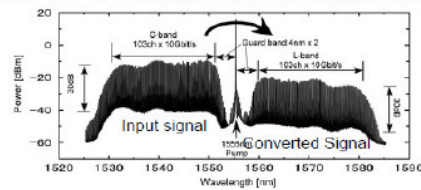
## Projeto Akari

### ✓ Tecnologias Chaves

- Conversão de  $\lambda$ s usando guias de onda *Quasi-Phase Matched Lithium Niobate* (QPM-LN) e *Transponders 3R*.



Ex.) 103 ch Simultaneous Wavelength Conversion



Fonte: Akari.

© Antônio M. Alberti

## Projeto Akari

### ✓ Tecnologias Chaves

- Construção de OXCs totalmente ópticos com até 100 portas usando tecnologia MEMS - *Micro-Electro-Mechanical System* e com velocidade de chaveamento na ordem de nanosegundos.
- Candidatos para sistemas de armazenamento de pacotes ópticos são:
  - *Serial optical to parallel electrical conversion buffers;*
  - *Optical fiber delay line buffers;*
  - *Optical slow light buffers;*
  - *Optical memory buffers;*
- As duas primeiras deverão estar disponíveis nos próximos 10 ou 15 anos, pois são de mais fácil implementação.

Fonte: Akari.

© Antônio M. Alberti

## Referências Bibliográficas

- ✓ RAMASWAMI, R., SIVARAJAN, K. , “*Optical Networks: A Practical Perspective*”, Segunda Edição, Morgan Kaufmann, 2002.
- ✓ MUKHERJEE, B., “*Optical Communication Networks*”, Notas de Aula, Disponível em:  
<http://serrano.cs.ucdavis.edu/~mukherje/259-wq02.html>
- ✓ FREIR, T., “*Optical Communications 2; Systems Engineering*”, Notas de Aula, Disponível em:  
[http://www.electronics.dit.ie/staff/tfreir/optical\\_2.htm](http://www.electronics.dit.ie/staff/tfreir/optical_2.htm)

## Referências Bibliográficas

- ✓ LIU, T. L., “*Introduction to Optical Networks*”, Seminário Interno, *National Center for High-speed Computing*, Disponível em:  
[http://kpp.nsysu.edu.tw/2004kpprcprep/seminer/20041208\\_Introduction%20to%20Optical%20Network.ppt](http://kpp.nsysu.edu.tw/2004kpprcprep/seminer/20041208_Introduction%20to%20Optical%20Network.ppt)
- ✓ KALYANARAMAN, S., “*Introduction to Optical Networking & Relevant Optics Fundamentals*”, Notas de Aula. Disponível em:  
<http://www.ecse.rpi.edu/Homepages/shivkuma/>
- ✓ CISCO, “*Fundamentals of DWDM Technology*”, Curso Online, Disponível em:  
[http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/mels/cm1500/dwdm/dwdm\\_ovr.htm](http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/mels/cm1500/dwdm/dwdm_ovr.htm)

## Referências Bibliográficas

- ✓ **JIANG**, X., “Optical Networks (1) - Introduction”, Notas de Aula. Disponível em: [www.hori.ecei.tohoku.ac.jp/~jiang/lecture/slide/Lecture-1.pp](http://www.hori.ecei.tohoku.ac.jp/~jiang/lecture/slide/Lecture-1.pp)
- ✓ **AKARI**, “New Generation Network Architecture: AKARI Conceptual Design”, Disponível em: [http://akari-project.nict.go.jp/eng/concept-design/AKARI\\_fulltext\\_e\\_translated\\_version.pdf](http://akari-project.nict.go.jp/eng/concept-design/AKARI_fulltext_e_translated_version.pdf)
- ✓ **NASCIMENTO**, L. H. B., “Contribuição ao Estudo de Redes Fotônicas de Pacotes”, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2003.

## Bibliografia

- ✓ **WALKER**, Marc et. al., “Multistage Distribution Switching Systems, Clos and Beyond”, disponível em <http://www.broadcastpapers.com/sigdis/Three%20Stage%20Routers.pdf>.
- ✓ **RIGAULT**, Claude, “Clos Networks: A Correction of the Jacobus Result”, disponível em <http://www.infres.enst.fr/~rigault/JACOBA.pdf>.
- ✓ **LIEW**, Song et. al., “Blocking and Nonblocking Multirate Clos Switching Networks”, disponível em [http://www.ie.cuhk.edu.hk/fileadmin/staff\\_upload/song/Journal/J9.pdf](http://www.ie.cuhk.edu.hk/fileadmin/staff_upload/song/Journal/J9.pdf).