

Sistemas e Redes Ópticas *Optical Systems & Networks*

WDM

Felipe Rudge Barbosa

rudge@dsif.fee.unicamp.br

DSIF - FEEC - Unicamp

= Maio 2021 =



Redes Ópticas

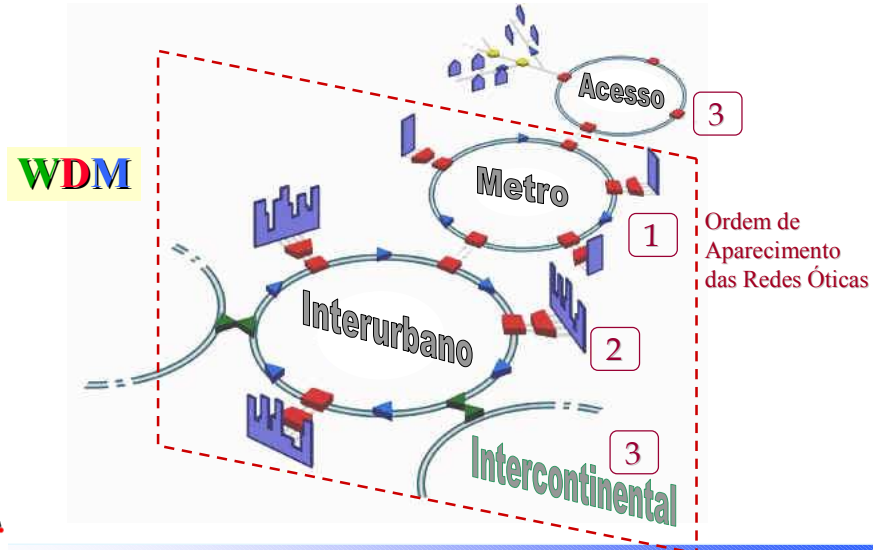
- **Redes Ópticas de Acesso** (*access; edge networks*)
 - ❖ Redes Metropolitanas (secundária -- distrib/coleta)
 - ❖ Redes "Locais" (urbanas e rurais)

- **Redes WDM**
 - **Redes Tronco** (*backbone; core networks*)
 - ❖ Redes Metropolitanas (primária)
 - ❖ Redes de Longa Distancia

- **Redes Fotonicas**



Natureza & Extensão



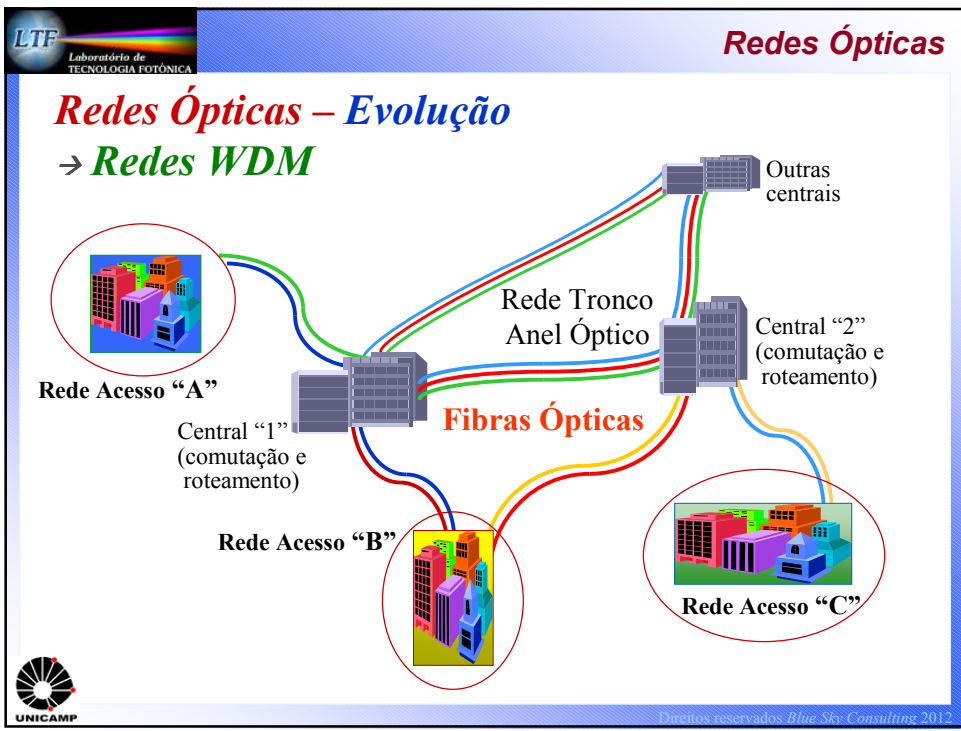
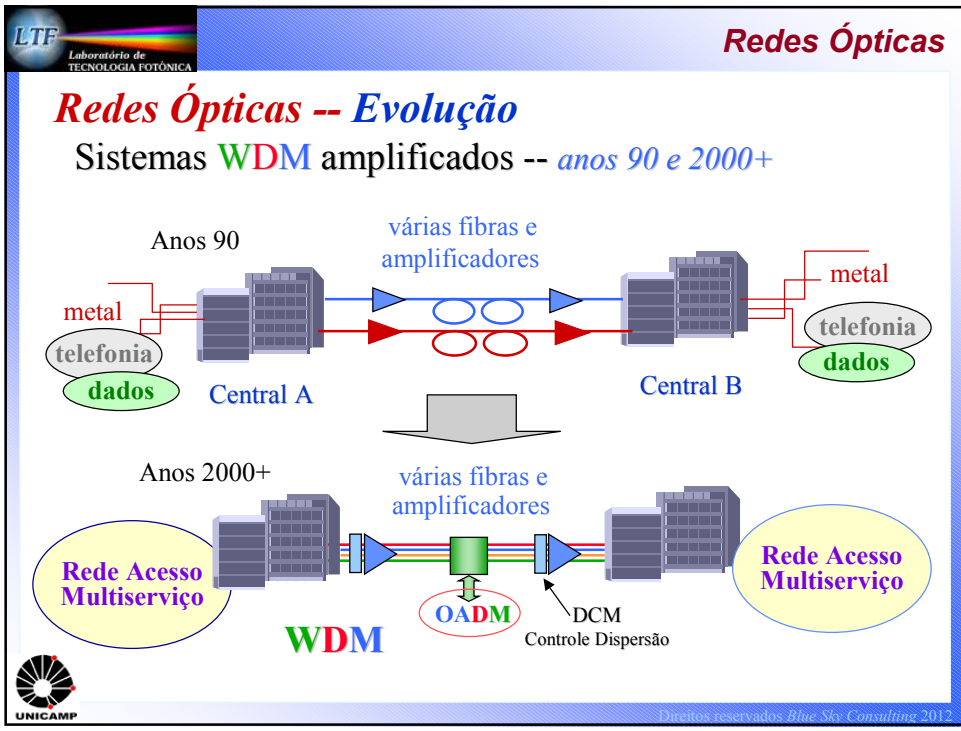
Capacidade & Alcance

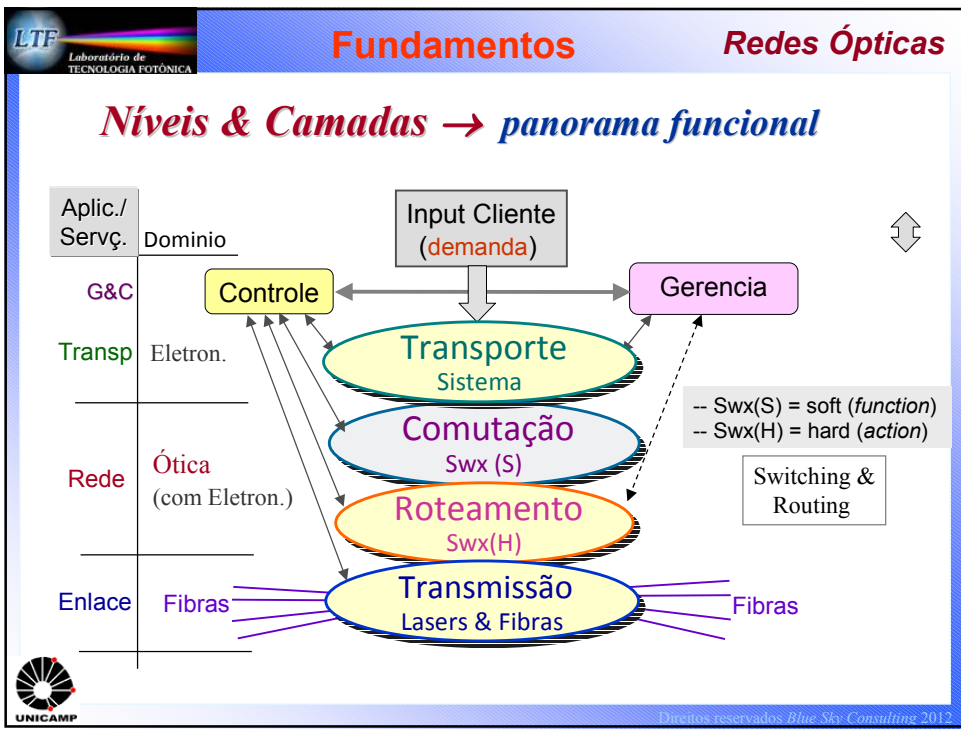
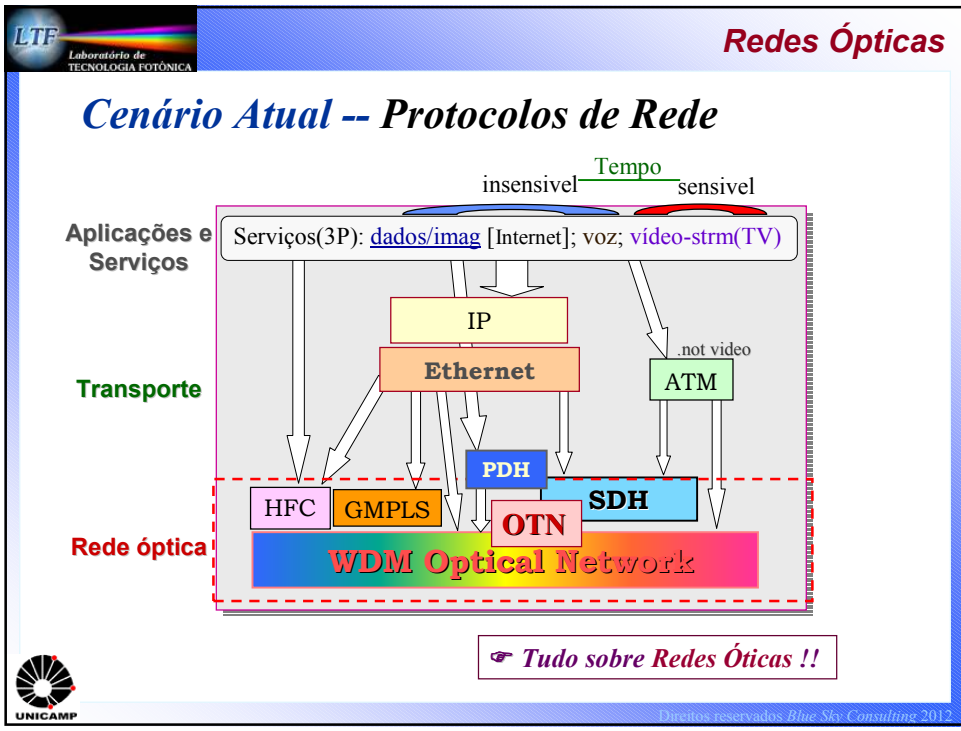
2016-2019

Redes Ópticas (resumo)	Distancia/Alcance (enlaces)	Capacidade (enlaces)
Metro-Acesso (distribuição)	= até 30 km (típico)	= 1 a 10Gb/s (cada λ) WDM ~ 12-24 (fixo)
Metro-Tronco (backbone)	= 30-60 km	40-100 Gb/s (cada λ) WDM ~24-32 (reconfiguravel)
Longa Distancia (interurbano) (nacional e intl.)	100-500 km > 1000 km	100-200 Gb/s (+) (cada λ) WDM >32-64 (reconfiguravel)

☞ valores p/ uma fibra ;; cabos metro 72-144; LD 36-72; Intercont.(subm.) <18

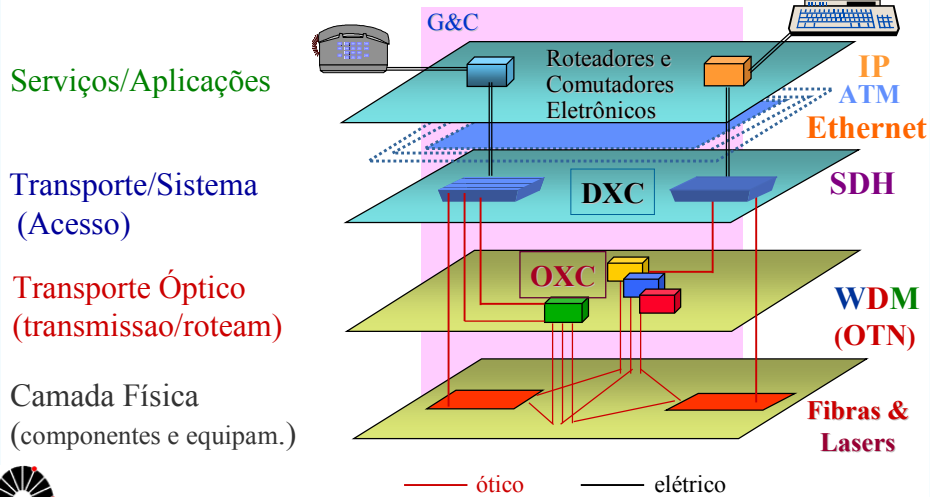






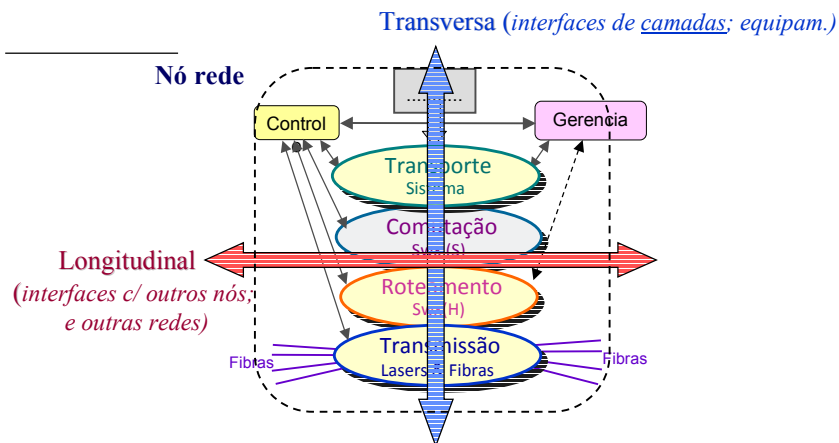
Camadas na Rede Óptica

Implementação

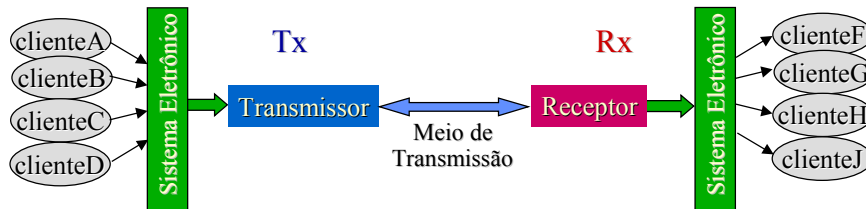


Níveis & Camadas → Compatibilidade

Padronização de Interfaces



Sistemas de Transmissão Multiplexação de Sinais

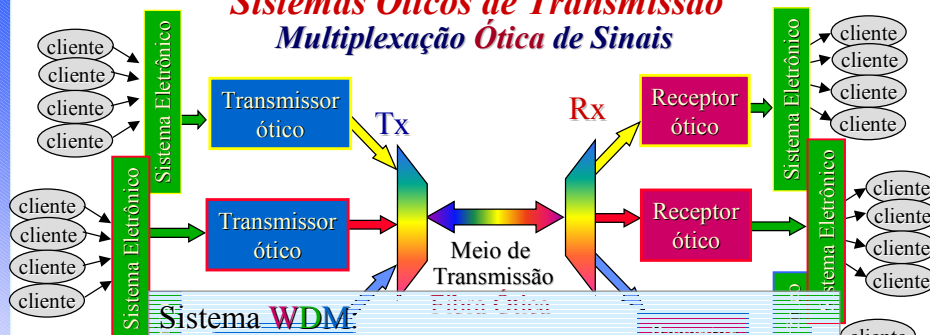


Sistema genérico:

- eletrônica é sempre indispensável;
- diferentes clientes ligam-se a um dado Sistema Eletrônico, que combina de forma organizada os vários sinais dos vários clientes, formando um sinal multiplexado;
- este sinal eletrônico multiplexado é transmitido;
- na recepção é de-multiplexado e distribuído organizadamente.



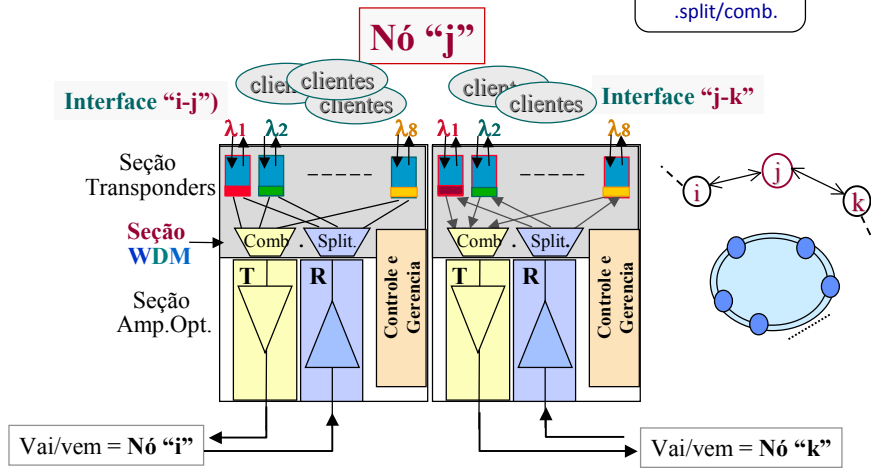
Sistemas Óticos de Transmissão Multiplexação Ótica de Sinais



- Sistema WDM:**
- vale tudo dito anteriormente ;
 - cada Sistema Eletrônico é transmitido em UM comprimento de onda, que corresponde a UMA frequência ótica;
 - um multiplexador ótico combina de forma organizada os vários sinais de diferentes comprimentos de onda, formando um sinal multiplexado ótico;
 - este sinal é transmitido pela fibra ótica;
 - na recepção é demultiplexado e distribuído organizadamente



Nó Óptico/ OADM com WDM (interface física)



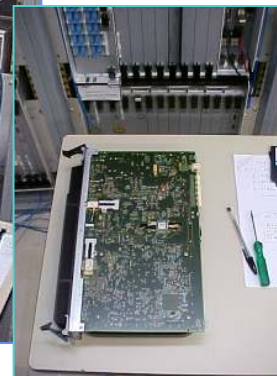
Seção
WDM
.split/comb.



Sistemas Óticos de Transmissão



Sistema WDM bidirec
40 canais ópticos 2,5 Gb/s
ou 20 canais ópticos 10 Gb/s
=> Amplificados e com
Controle de Dispersão
(Marconi – 2003-2004)



Sistemas Óticos de Transmissão

Lightwave Staff -
May 2017

2019 world record remains

- ❖ **NEC transmits 50.9 Tbps over 10,000 km via C+L EDFA**
 - ⇒ NEC's approach involves a **multilevel, linear and nonlinear constellation** optimization algorithm that produced **32QAM (Opt32)**. The format achieves capacities close to the Shannon Limit with a higher nonlinear capacity limit than other approaches.
 - ⇒ NEC Corp. says it will use the post-deadline session of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2017, held this week at the San Jose Convention Center, to discuss their demonstration of **50.9-Tbps on a single optical fiber** over a distance greater than **11,000 km** via a new modulation algorithm and **C+L band** erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs).
 - ⇒ The NEC researchers used the Opt32 modulation format to achieve **spectral efficiency of 6.14 b/s/Hz** over a trans-pacific distance. As such, NEC sees the technology as particularly useful to long-distance **submarine network** applications.



Histórico

- ❑ **Redes Óticas** (monocanal, 1a. Geração; anos 80)
 - ☞ enlaces óticos ponto-ponto, entre nós da rede, conversão O/E/O em cada nó; qq. lambda;
 - sequencia: 1a=850nm, 1b=1300, 1c=1550nm;
 - ☞ entre centrais telefônicas; metro- e longa dist.
- ❑ **Redes WDM** (Redes Óticas 2a. e 3a. Geração; anos 90>)
 - Redes de Entroncamento (*backbone*)
 - 2a.G: vários comprimentos de onda (amplificados) em cada enlace; conversão O/E/O em cada nó; **roteamento eletrônico**;
 - 3a.G: vários comprimentos de onda (amplificados) em cada enlace; sem necessidade de conversão O/E/O em cada nó; **roteamento ótico** ⇔ **Redes Fotonicas!**
 - ❖ Redes Metropolitanas
 - ❖ Redes de Longa Distancia

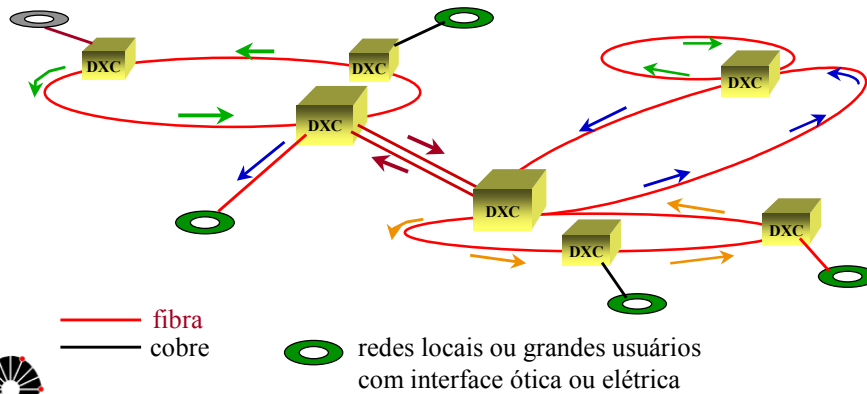


1a. Geração Redes Ópticas – sem WDM

Redes com “Um” Comprimento de Onda

(Cross-connect digital *com* Conversão E-O)

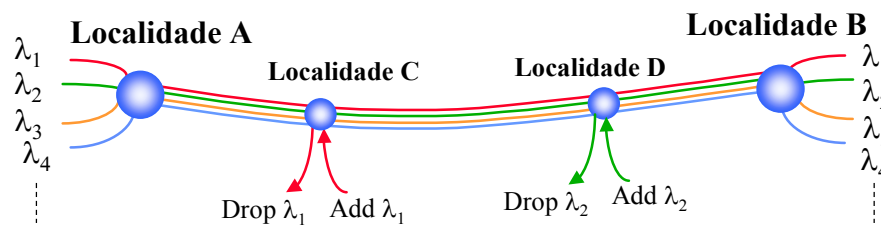
== solução “antiga” ==



2a. Geração Redes Ópticas – com WDM

Redes WDM -- Tráfego Óptico –

Enlaces WDM: transmissão, inserção, deriva

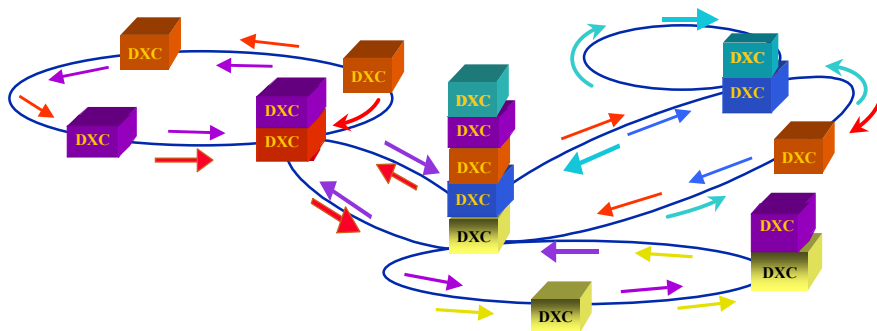


2a. Geração Redes Óticas – *com* WDM

Redes com **Vários** Comprimentos de Onda

(Cross-connect Digital *com* Conversão E-O)

== solução Rede WDM-1 ==

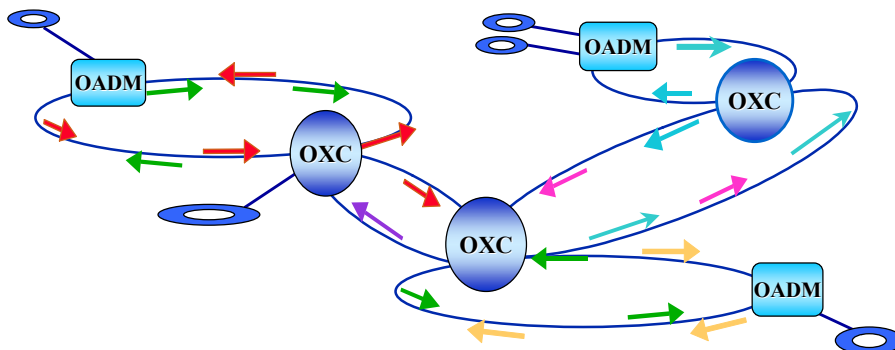


3a. Geração Redes Óticas – *com* WDM

Redes com **Vários** Comprimentos de Onda

(Cross-Connect Óptico *sem* Conversão O-E)

== solução WDM-2 ==

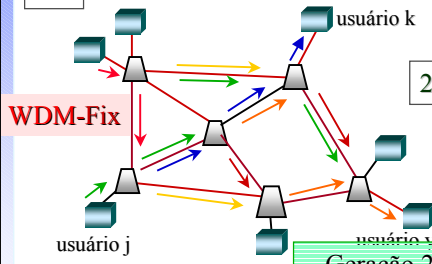


Redes WDM – Redes Ópticas 2a. e 3a. geração

Transmissão Óptica

com conversão opto-elétrica;
roteamento/comutação
eletrônica

2a. (solução legada/estabelecida)

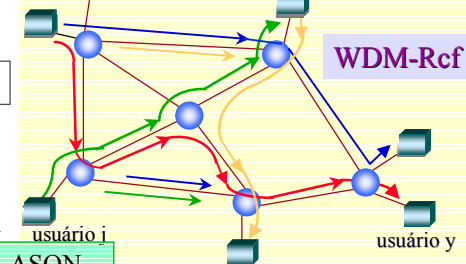


Transmissão/Roteamento Ópticos

☑ Rede Ótica reconfigurável

Sem conversão E-O (ao longo da rede)
(solução atual e futura!..)

3a.



2,5a.

Geração 2.5 – ASON
Planos Gerencia e Controle;
Transporte WDM; separads
(2002-2008)

▲ Nó Opto-Elétrico

■ Terminal OptoE

— Fibra Óptica (todas conexões)

● Nó Óptico (roteamento)



Sistemas de Transmissão

Parâmetros Relevantes

= Transporte Óptico =

Protocolos de Redes Óticas

SDH/Sonet ; OTN ; ASON;

☞ ..vamos lá e voltamos pra cá !.

Já vimos => IE008-a2_SDH-PDH_Eth=

Agora é esse => IE008-g2_TrspOTN-SDH=



Arquitetura de Redes

Def.: Redes são constituídas de nós e enlaces .
Existem múltiplos protocolos de interconexão dos nós;
Existem múltiplas camadas nos nós e enlaces.



Arquitetura de Redes

□ Atributos

- define mecanismos de comunicação comuns a toda a rede ;
- define interfaces padronizadas
 - ⇒ Externas: para os vários usuários ;
 - ⇒ Internas: para interconexões dos nós da rede;
- aborda aspectos físicos e funcionais da rede.

□ Abrangência (aspectos físicos e funcionais)

- ❖ Topologia da rede
- ❖ Protocolos de acesso e Interfaces
- ❖ Interconexões da rede
- ❖ Sistemas de transmissão, multiplexação, roteamento;;
- ❖ Supervisão e Gerência;
- ❖ Sinalização e Proteção (sobrevivência de serviços).



Arquitetura de Redes

- Atributos adicionais
 - ⇒ aprimoramento e expansão da rede: critérios e alternativas;
 - ⇒ suporte a novos serviços;
 - ⇒ latência.

Em resumo,

- ☞ A arquitetura da rede é formada pela estrutura de níveis, pelas interfaces e pelas interconexões.
 - define todo o projeto da rede, e suas configurações estática e dinâmica (estrutural e funcional).



Arquitetura de Redes

- Sistema de Transmissão
 - ❖ Hierarquias de transmissão
 - taxas e formatos; nível de agregação)
 - ❖ Comprimentos de Onda
 - ♦ quantidade e alocação Rede Principal e nas Sub-redes
 - ❖ Amplificadores Ópticos
 - ♦ posicionamento e características
- Dimensões da Rede
 - ⇒ dimensionamento físico de enlaces;
 - ⇒ grau de conectividade e número de nós ;
- Topologia da Rede
 - ⇒ adequação a Rede Principal;
 - ⇒ divisão em Sub-redes;

☞ *Todos os aspectos devem ser considerados em conjunto*



Sistemas de Transmissão

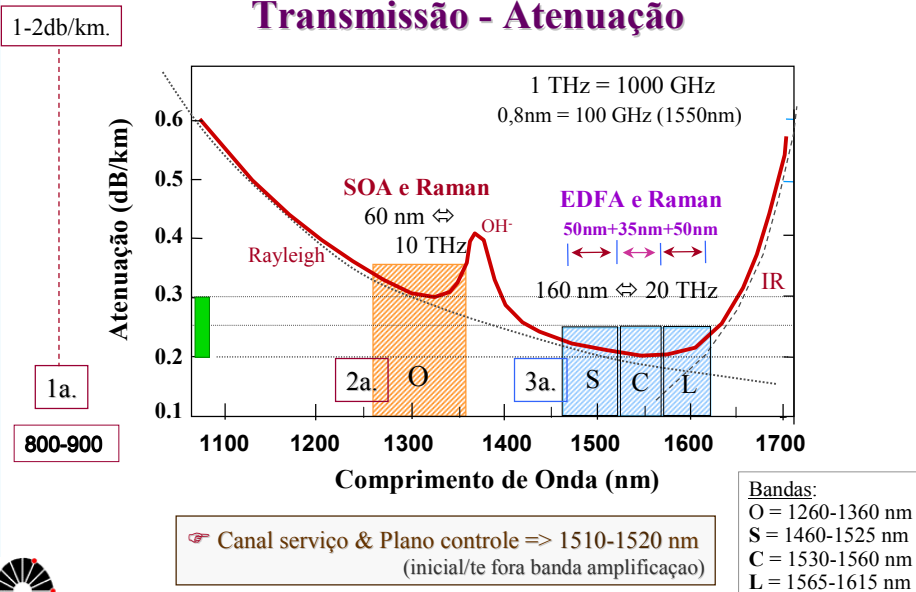
Parâmetros Relevantes
= Camada Física =

- Balanço Potencia e Perdas;
 - Atenuação na Propagação e nos elementos;
 - Dispersão Cromática e PMD;
 - Precisão, estabilidade e largura de linha dos Lasers ;
 - Formato modulação e taxa de linha;
 - Amplificação e Efeitos não-lineares;
- ☞ Outros *ruídos e distorções* introduzidos pelos **Elementos Ópticos** da Rede (OADM; splitters) e **MAI** (interferencia de acesso múltiplo – devido a entradas, saídas e co-propagação de tráfego).



Fibras Ópticas

Transmissão - Atenuação



Sistemas de Transmissão

Parâmetros Relevantes

- Formato modulação e taxa de linha;
 - ❑ Transmissões em altas taxas (10 G, 40G, 100G) passam a requerer não mais simples IM-DD, mas sim formatos multinível e multidimensional, com quadratura e detecção coerente;

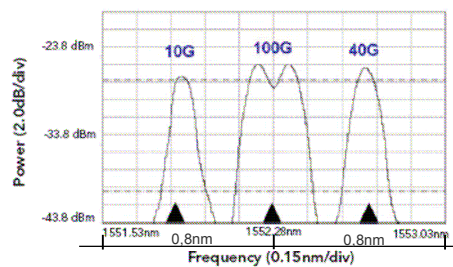


Figure 2. Optical frequency division multiplexing comparison: (a) 10 Gb/s single-polarization, single-carrier; (b) 100 Gb/s coherent dual-polarization, dual-carrier; (c) 40 Gb/s coherent dual-polarization, single-carrier. Channels are centered on the 50 GHz ITU grid.



Transmissão e Comutação

Entrando e saindo da Rede...

Atrasos na Transmissão e Comutação (latência):

- ❑ Determinísticos
 - ⇒ Conversão E-O: Tx, Rx (terminais & pts. intermeds.);
 - ⇒ Propagação: linha/distancia e elementos longos (entre nós);
 - ⇒ Comutação: conversão e processamento (nos nós);
- ❑ Estocásticos
 - ⇒ “Previsto”: estatística de tráfego;
 - ⇒ “Imprevisto”: surtos de tráfego e falhas na rede;



Topologia da Rede

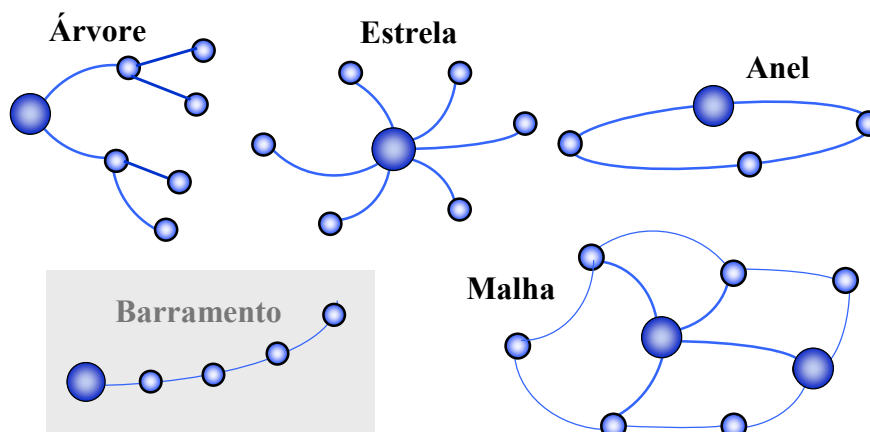
- ❑ **Topologia** da rede define a forma de interconexão dos nós da rede; (pode ser *uni-bi-tridimensional*, mais não!) ;
- ❑ uma topologia não define distancias, nem a forma geométrica da rede;
- ❑ temos topologia lógica e topologia física; que podem não coincidir (p/ex., topologia física em *anel* pode estar estruturada como topologia lógica estrela)

complemento cultural ...

- ✧ *Topografia* define as características de uma superfície (p/ex., terreno);
- ✧ *Geometria* define a forma específica de uma figura ou um sólido (uni-bi-tri-multidimensional)



Topologia da Rede



☞ diferentes trechos das redes podem ter diferentes topologias; e se agruparem/combinarem...



Redes WDM

Roteadores Ópticos

Elementos ativos e passivos;

[*network elements (NE)*]

☞ os múltiplos aspectos e elementos de rede devem ser considerados em conjunto, pois é assim que vão funcionar.



Roteadores Ópticos

- Função OADM (Deriva-Adiciona Óptico)
 - elemento ótico que através de filtros e divisores/combinadores de feixe [mux/demux] permitem extração e adição de um ou mais comprimentos de onda (*lambdas*);
- Função OXC (Conexão cruzada Óptica)
 - elemento ótico que permite reconfigurar/rearranjar os canais óticos (*lambdas*), (e/ou as próprias fibras), nas portas (entrada-saída) de uma interconexão ótica (nó).

>> >>

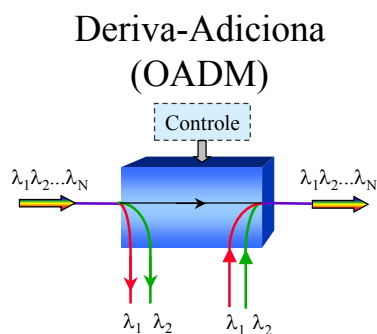


Roteadores Ópticos

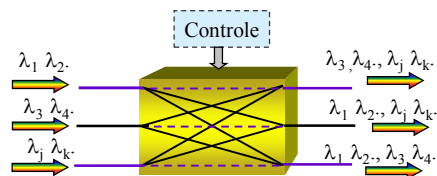
- **Função:** conexão cruzada (roteamento) ou deriva/insere
- **Tipos:**
 - ⇒ **Roteador Passivo (fixo, configurável no projeto):**
 - ☑ usa elementos ópticos passivos: acopladores, filtros, multiplexadores e demultiplexadores.
 - ☑ redes ópticas convencionais;
 - ☑ custo reduzido, alta confiabilidade
 - ⇒ **Roteador Programável (ativo, reconfigurável na rede):**
 - ☑ usa filtros sintonizáveis, chaves ópticas e conversores de comprimento de onda.
 - ☑ confere flexibilidade à rede;
 - ☑ tem custo elevado, boa confiabilidade



Roteadores Ópticos



[ROADM]
adiante



Cross-bar switch:
- paralelo (bar)
- cruzado (cross)

↪ ambos podem ser **passivos (fixos)** ou **ativos (reconfiguráveis)**



Roteadores Ópticos

Resumo

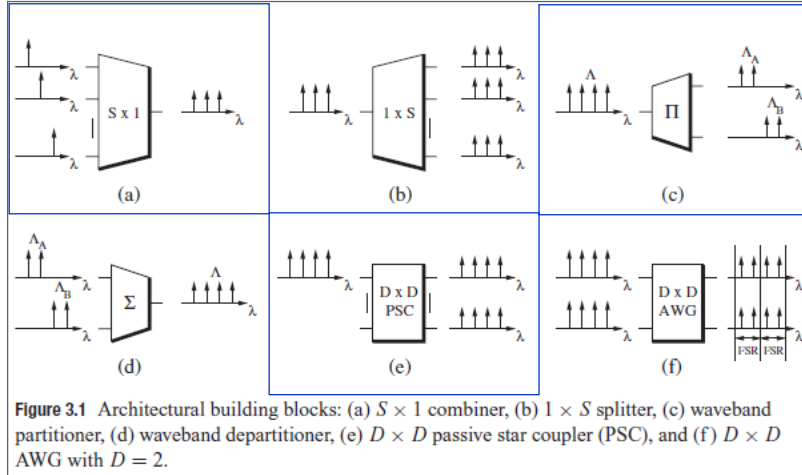


Figure 3.1 Architectural building blocks: (a) $S \times 1$ combiner, (b) $1 \times S$ splitter, (c) waveband partitioner, (d) waveband departitioner, (e) $D \times D$ passive star coupler (PSC), and (f) $D \times D$ AWG with $D = 2$.

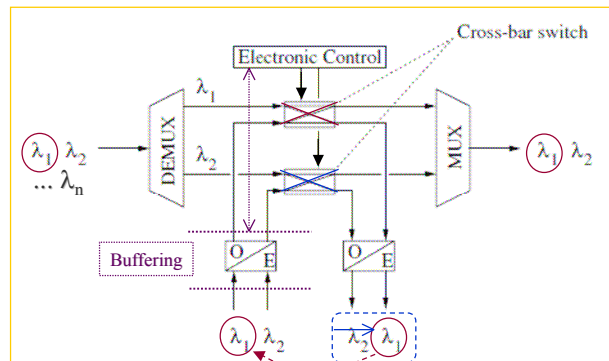


M.Maier, *Optical Switching Networks*, 2008

Direitos reservados Blue Sky Consulting 2012

Roteadores Ópticos

- Função R-OADM (Deriva-Adiciona Óptico Reconfigurável)
 - ⇒ elemento óptico ativo que através de filtros e divisores/combinadores de feixe (mux-demux) e chaves óticas, permite extração e adição de um ou mais comprimentos de onda (*lambdas*); sendo possível mudar rotas e lambdas.

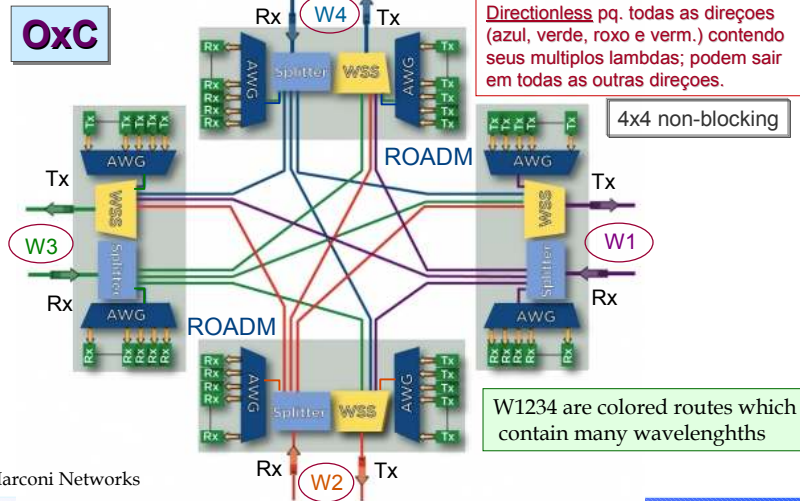


M.Maier, *Optical Switching Networks*, 2008

Direitos reservados Blue Sky Consulting 2012

OxC/ROADM with WSS (wavelength selective switch)

=> splitters, couplers, AWGs, WSS and electronic control



Source: Marconi Networks

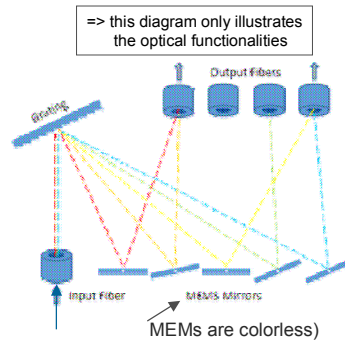
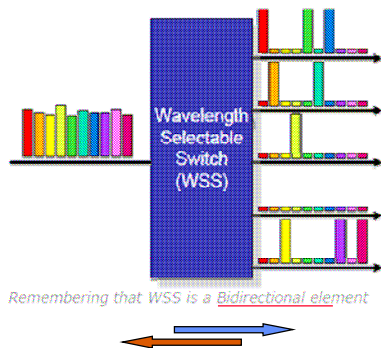
Direitos reservados Blue Sky Consulting 2012

Photonic Networks – WDM/OCS

Filtres & Mux/Demux Optics

Schematic illustration of the WSS operation

WSS



Source: JDSU Corp.

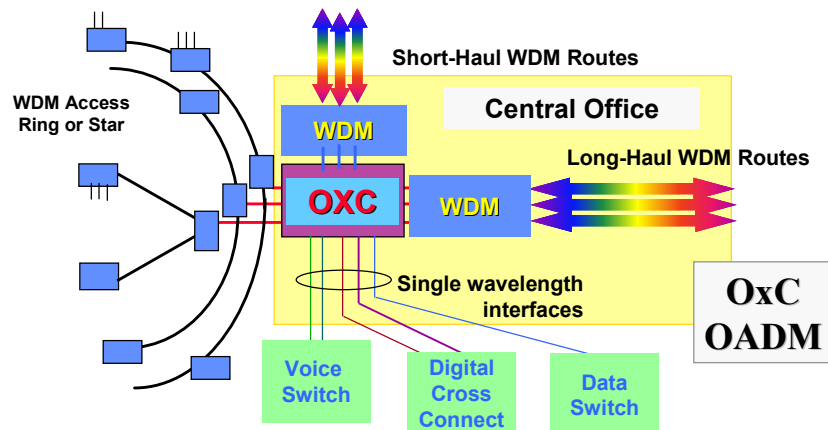


Direitos reservados Blue Sky Consulting 2012

Rede com Vários Comprimentos de Onda

(Cross-connect Óptico sem Conversão E-O)

== solução WDM 2a. Geração ==



Source: CIENA Corp.

Direitos reservados Blue Sky Consulting 2012

Redes Ópticas WDM

Conclusão (parcial, again...)

- ✓ **Redes Ópticas WDM** constituem-se na melhor (ou única) opção tecnológica para transporte de alta capacidade:
 - o menor custo/bit ;
 - máxima segurança e privacidade;
 - alta confiabilidade;
 - ❑ disponibilidade & permanência;
 - ❑ estabilidade & isolamento;
 - elevada escalabilidade;
 - ❑ facilidade ampliação e evolução hierarquias;
 - proteção e sobrevivência serviços. (veremos + adiante)
- Elevados cuSto\$ de equipamentos e instalação requerem cuidadoso planejamento de investimentos !!



Direitos reservados Blue Sky Consulting 2012

Redes WDM

Mundo real

- ❖ Testes de Campo
- ❖ Outras Redes

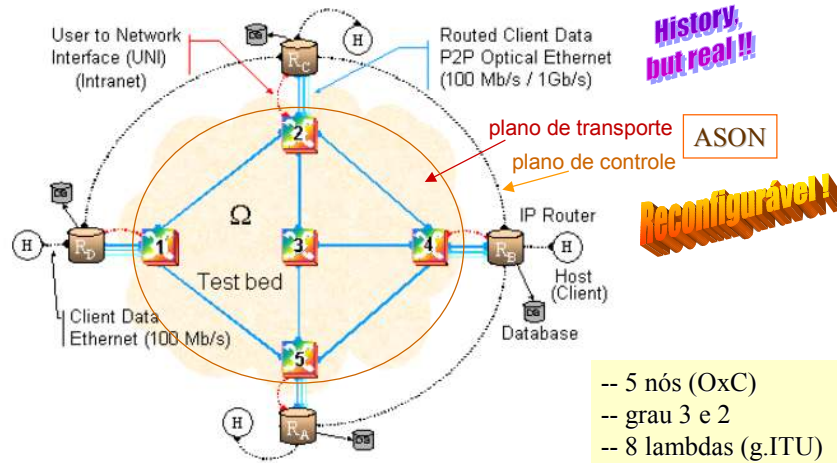


Redes WDM

- ❖ Testes de Campo :
 - Rede Giga (CPqd e RNP-, Brasil)
 - ⇒ <http://www.giga.org.br/> [Finep, Funttel]
 - ✓ Rede Kyatera (Fapesp, São Paulo)
 - ⇒ <http://kyatera.incubadora.fapesp.br/portal>
 - ✓ MONet (Multiwavelength Optical Network, USA)
 - ✓ ACTS Open (Optical Pan-European Network, UE)
 - ✓ ACTS Photon (Photonic Network, UE)
 - ✓ GÉANT -- Pan-European Network (EU, 2013-14)
- ❖ Outras Redes
 - National Lambda Rail (www.nlr.net) USA.
 - Telia-Sonera (Suécia-EUA)
 - Nordu; Cogent; and so on...



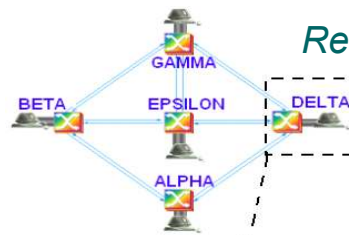
Rede Omega – CPqD/Ericsson => Rede Giga
2001-2004 2006-2008



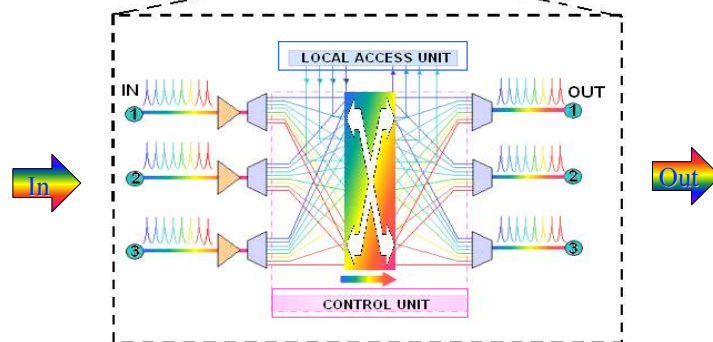
Fonte :: Monica Rocha, et al., ELECTRON. LETT. 7th November 2002 Vol. 38 No. 23



Rede Omega – CPqD/Ericsson



- Cinco nós WDM
- Oito lambdas (planej)
- Cinco lambdas (realiz)
- Taxa 2,5 Gb/s escalável p/ 10 Gb/s



Rede Omega-

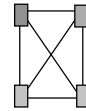
Nó Ótico WDM



Conexão Cruzada WDM
(OXC)



8 canais
4::2
(seis combs)



Roteador Óptico



Rede Óptica Experimental
Projeto Kyatera

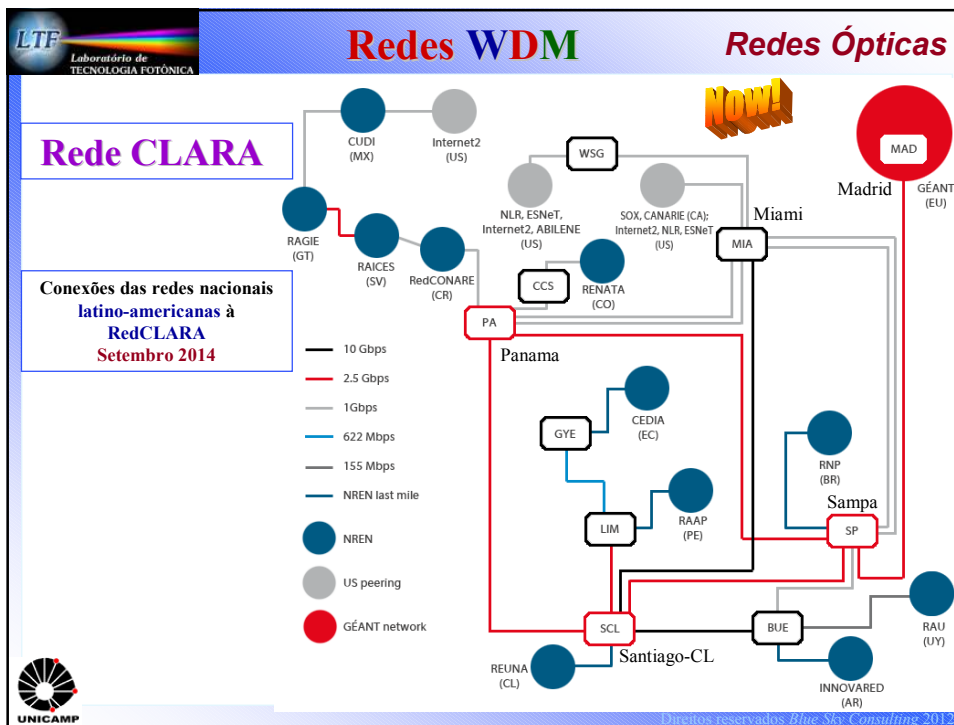


- Experimental (acesso restrito)
- Stable Net-20G (2x10Gb/s)
- Stable Net-1G (multiplos 1Gb/s)

Experimental Net
Stable Net 20 Gbps
Stable Net 1 Gbps

www.kyatera.fapesp.br





LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Redes WDM Redes Ópticas

Rede CLARA

- ❖ A RedCLARA é responsável pela implementação e gerenciamento da infraestrutura de rede que interliga as Redes Nacionais de Educação e Pesquisa (RNIE) das universidades e centros de pesquisa da América Latina.
- ❖ O tronco (backbone) da RedCLARA é formada por dez nós roteadores principais, conectados em uma topologia ponto-a-ponto. Cada nó principal (IP - Protocolo Internet) representa um PoP (Ponto de Presença) para a RedCLARA, nove deles estão localizados em um país da América Latina [São Paulo (SAO - Brasil), Buenos Aires (BUE - Argentina), Santiago (SCL - Chile), Lima (LIM - Peru), Guayaquil (GYE - Equador), Bogotá (BOG - Colômbia), Panamá (PTY - Panamá), San Salvador (El Salvador) e Tijuana (TIJ - México)]- e o décimo se encontra em Miami (MIA - Estados Unidos).
- ❖ O tronco de RedCLARA está interconectada com a Rede Pan-europeia GÉANT2 mediante a ligação do PoP da RedCLARA em SAO com o ponto de acesso da GÉANT2 em Madri (Espanha - ES);
- ❖ com os Estados Unidos, por meio das ligações estabelecidas nos PoP da CLARA em Miami e São Paulo, o primeiro conectado ao ponto de troca AtlanticWave e o segundo àquele de MANLAN em Nova York.

Direitos reservados Blue Sky Consulting 2012

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÓNICA

Redes WDM **Redes Ópticas**

GÉANT At the Heart of Global Research Networking

GEANT Coverage

- ALICE2 - INOCLARA Network
- EUMEDCONNECT2 Network
- TEIN2 Network
- HP-SEE Project
- AfricaConnect - UbuntuNet Alliance
- CAREN Network
- SAKA-Afghanistan
- SARINET Network

Dark Shading: Connected to regional network
Light Shading: Eligible to connect to regional network

Reality!

GÉANT-2 is the pan-European research and education network that interconnects Europe's National Research and Education Networks (NRENs). Connecting over 50 million users at 10,000 institutions across Europe, supporting research in areas such as energy, the environment, space and medicine.

DANTE

www.dante.net

GÉANT

www.géant.net

connect • communicate • collaborate

GEANT is co-funded by the European Union within its 7th R&D Framework Programme.
This document has been produced with the financial assistance of the European Union. The contents of this document are the sole responsibility of DANTE and can under no circumstances be regarded as reflecting the position of the European Union.

7
EUROPEAN RESEARCH INFRASTRUCTURE PROGRAMME

Direitos reservados Blue Sky Consulting 2012

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÓNICA

Redes WDM **Redes Ópticas**

Rede GEANT2

Legend:

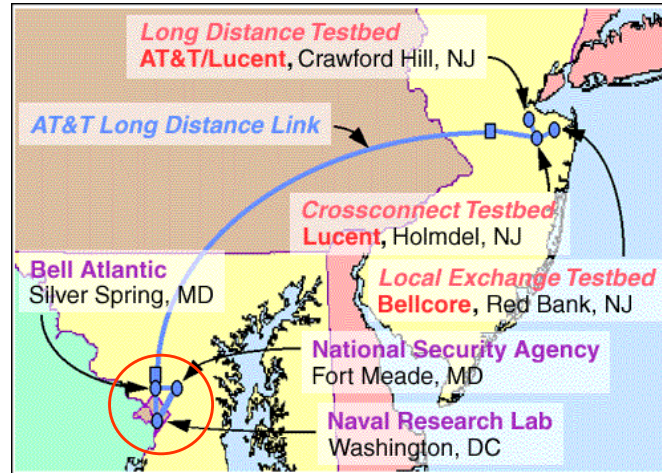
- >=100Gps and <=100Gps
- 100Gps
- 200Gps
- 300Gps
- >=1000Gps

UNICAMP

Direitos reservados Blue Sky Consulting 2012

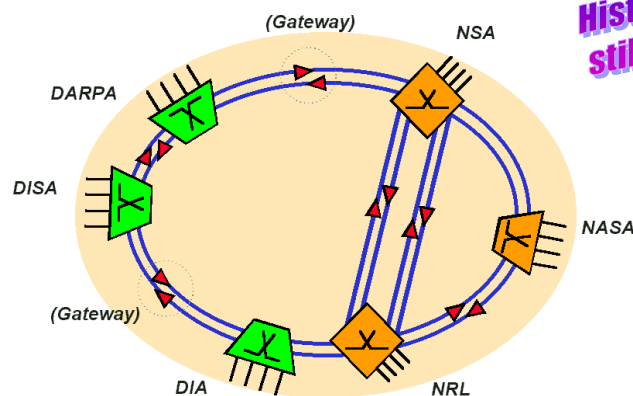
History!

MONET - Implementação Configuração Inicial - 1998-99



MONET - Implementação Interconexão de Anéis Protegidos Washington DC, início 1998-99

**History >>>
still alive**



⇒ *anel metropolitano; dezenas km*



MONET - Tecnologia

- ❑ Fontes WDM, deriva-insere ópticos (OADM) e conexões transversais ópticas (OxC) reconfiguráveis.
- ❑ Oito comprimentos de onda
- ❑ 2.000 km fibras em NJ (USA):
 - convencional (SMF)
 - dispersão não-nula (NZD) positiva e alternada .
- ❑ Topologia em anel, com 6 nós OADM; e gerência de rede;
- ❑ Taxas de 52 Mbit/s a 10 Gbit/s (hierarquias SONET);
- ❑ Tráfego sinais analógicos, SDH/Sonet, IP, outros digitais bbase.

http://www.bell-labs.com/project/MONET/mon_pro.html

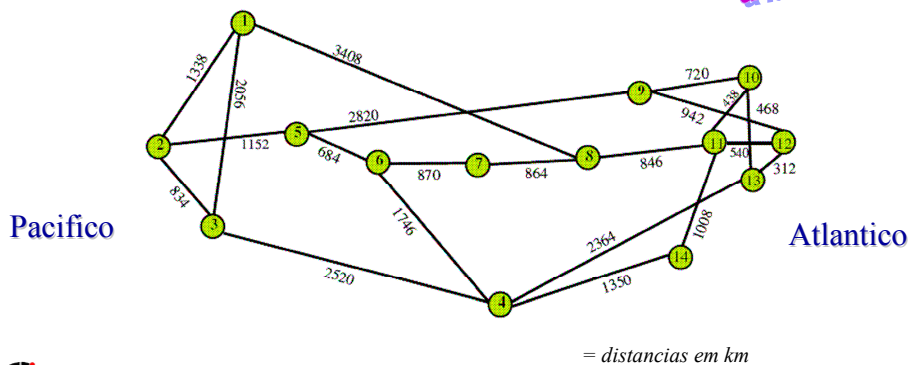


NSFNET - Implementação (anos 90)

(National Science Foundation Research Network)

- Rede nacional de pesquisa (EUA)
 - ❑ 14 nós (1a. versão); 21 nós (2a. versão)

*History!
& fantasy..*



Rede Óptica Operacional

NLR Offers National Lambda Rail -- *rede americana pesquisa e educação*
An Advanced, Multi-Service Network . . . and Built-in Connectivity to Regions Coast-to-Coast

13 Regional Networks are NLR Members



Key Facts

- Capacity: Up to 1600 Gbps
- Ownership: U.S. research and education community
- Participating universities, federal labs: 280+
- Ultra high availability: 99.999% on Layer 1 routes, 100% on Layer 2 nodes
- Coverage: 12,000 miles, 30+ major cities
- Founded: 2003
- Headquarters: Cypress, CA

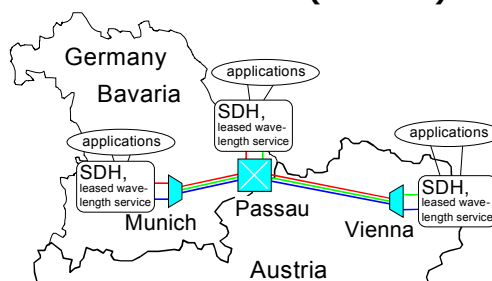


Rede Óptica Experimental Projeto PHOTON

History!



Pan-European Photonic
Transport Overlay Network
(início 1998)



PHOTON Summary of Trial (2001-2003)

Realisation and **application** of a border crossing star network called *PHOTONET*, using *WDM links* and *WDM OXC*.

The WDM trial allocates 8 channels in the 1550 nm range; 400 GHz spacing is used in the German part of the network, and 200 GHz spacing is used in the Austrian part.

The field trial network is located between Munich and Vienna with the OXC located in Passau.

Based on installed standard single mode fibres and on commercially available components.

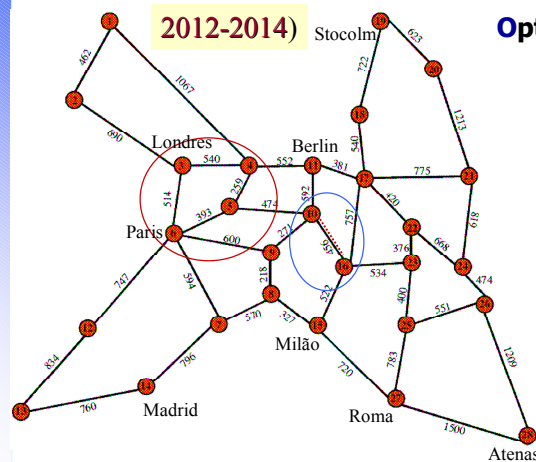
Demonstrates WDM transmission with data rates up to 10 Gbit/s per wavelength over 500 km,

WDM amplification and dispersion compensation.

WDM cross-connection, optical WDM supervision, and application of the WDM transport network.



Rede Óptica Experimental Projeto OPEN



Optical Pan-European Network

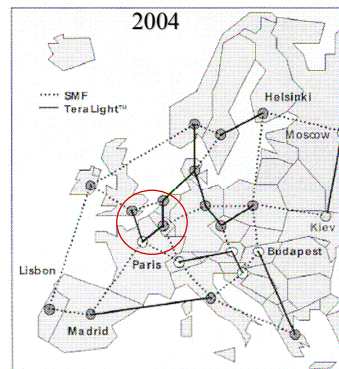
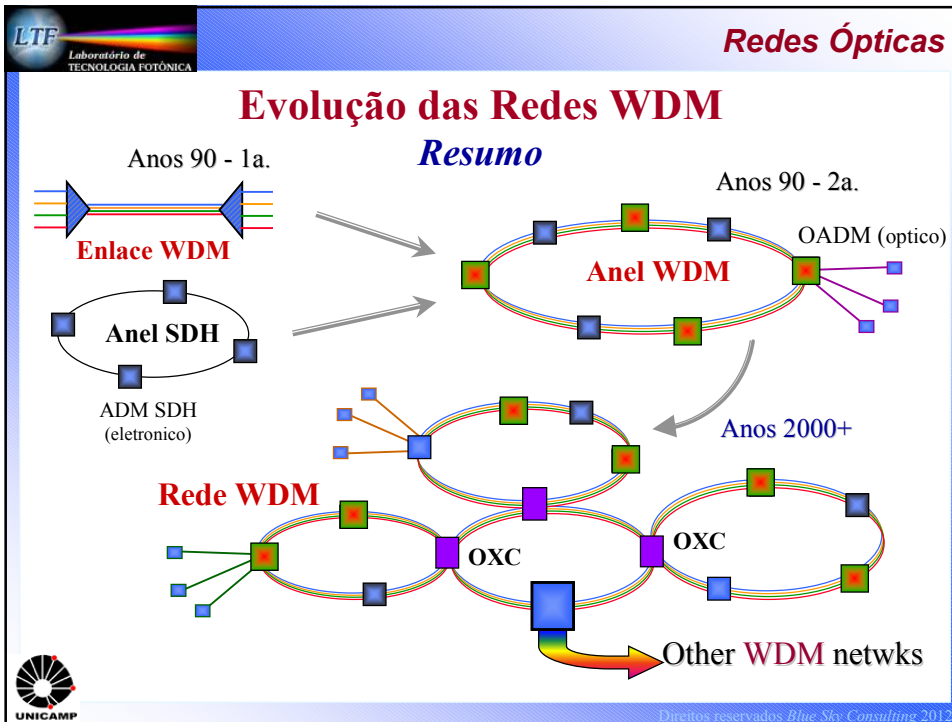


Fig. 1. Pan-European network topology (extended with Kiev and Moscow).

Fonte: JLT2004_Penninckx-OPENtwk





Redes Ópticas

Redes Ópticas WDM

Conclusão

- ✓ Redes Ópticas WDM constituem-se na melhor opção tecnológica para transporte de alta capacidade:
 - o menor custo/bit ;
 - máxima segurança e privacidade;
 - alta confiabilidade;
 - ❑ disponibilidade & permanência;
 - ❑ estabilidade & isolamento;
 - elevada escalabilidade;
 - ❑ facilidade ampliação e evolução hierarquias;
 - proteção e sobrevivência serviços.
- *Elevados custos de equipamentos e instalação requerem cuidadoso planejamento de investimentos !!*

UNICAMP

Direitos reservados Blue Sky Consulting 2012