

Pedro Carrascosa Conrado Dias

REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de
Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia de Computação

ORIENTADORA: Mônica de Lacerda Rocha

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D541 Dias, Pedro
r Redes Ópticas Elásticas / Pedro Dias; orientadora
 Mônica Rocha; coorientadora Maximilian Luppe. São
 Carlos, 2018.

 Monografia (Graduação em Engenharia de Computação)
-- Escola de Engenharia de São Carlos e Instituto de
Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de
São Paulo, 2018.

 1. Redes Ópticas Elásticas. 2. Bandwidth Variable
Transponders. 3. Flexgrid. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Pedro Carrascosa Conrado Dias

Título: “Redes Ópticas Elásticas”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido em 22/11/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dra. Mônica de Lacerda Rocha (Orientadora)
- SEL/EESC/USP

Aprovado

Prof. Titular Amílcar Careli César
SEL/EESC/USP

Aprovado

Mestre André Luiz Ferraz Lourenço
Doutorando - SEL/EESC/USP

Aprovado

Coordenador do Curso Interunidades Engenharia de Computação:

Prof. Dr. Maximilian Luppe

Agradecimentos

Agradeço a minha família, Antonio Gabriel, Josyanne e Marina pelo apoio durante a graduação

.
À minha namorada Rafaella por me passar tranquilidade.

A minha orientadora Mônica pelos conselhos e todo aprendizado.

Sumário

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
CAPÍTULO 2 EVOLUÇÃO PARA REDES ÓPTICAS FLEXGRID	4
2.1 A HISTÓRIA DAS GRADES ITU E EVOLUÇÃO PARA FLEXGRID	4
2.2 ARQUITETURAS DWDM DE GRADE FIXA.....	5
2.3 WAVELENGTH SELECTIVE SWITCH (WSS)	7
2.4 ARQUITETURAS ROADM	8
2.5 DESEMPENHO DE REDES FIXAS E FLEXGRID.....	9
2.6 MIGRAÇÃO PARA O FLEXGRID.....	11
CAPÍTULO 3 CONCEITOS DAS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	13
3.1 FLEXGRID E EON	13
3.2 EXEMPLO DE OPERAÇÃO DE UMA EON.....	14
CAPÍTULO 4 ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO	18
4.1 CONCEITOS BÁSICOS.....	18
4.2 TÉCNICAS DE RESOLUÇÃO	22
4.3 PROVISIONAMENTO ELÁSTICO DE LARGURA DE BANDA	24
CAPÍTULO 5 TRANSMISSÃO EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	27
5.1 LIMITAÇÕES DO SISTEMA	27
5.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS PARA EONS	29
5.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS NO TRANSMISSOR	31
5.4 PROCESSAMENTO DE SINAL DIGITAL NO RECEPTOR.....	32
CAPÍTULO 6 ARQUITETURAS DE NÓ PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	35
6.1 REQUISITOS PARA NÓS ÓPTICOS FLEXÍVEIS	35
6.2 REGRAS DE DESIGN	37
6.3 ADD/DROP.....	40
6.4 ARQUITETURAS DE NÓ E INTERFACE COM AS REDES	41
CAPÍTULO 7 SLICEABLE BANDWIDTH VARIABLE TRANSPONDERS	44
7.1 ARQUITETURAS DE S-BVTs.....	44
7.2 S-BVT EM RELAÇÃO A OUTRAS CAMADAS	51
CAPÍTULO 8 PLANO DE CONTROLE GMPLS	57
8.1 ARQUITETURA DO PLANO DE CONTROLE GMPLS.....	58
8.2 PLANO DE CONTROLE PARA EON	61
CAPÍTULO 9 SOFTWARE DEFINED NETWORKING	66
9.1 ARQUITETURA SDN	66
9.2 PROTOCOLO OPENFLOW	68
9.3 SDN PARA REDES ÓPTICAS	69
CAPÍTULO 10 CONCLUSÃO	73

Lista de Siglas

ADC Analog-to-Digital Converter
APSK Amplitude and phase-shift keying
B&B Branch & Bound
BPSK Binary Phase Shift Keying
BRKGA Biased Random-Key Genetic Algorithm
BVT Bandwidth Variable Transponders
C/D/C Colourless Directionless Contentionless
CAPEX Capital expenditure
CMOS Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DAC Digital-to-Analog Converter
DBP Digital Back-Propagation
DD Direct-Detection
DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA Erbium-Doped Fiber Amplifier
ENOB Effective Number of Bits
EON Elastic Optical Network
ERO Explicit Route Object
FEC Forward Error Correction
FTP File transfer protocol
GMPLS Generalized Multi-Protocol Label Switching
GN Gaussian Noise
GRASP Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
GVD Group Velocity Dispersion
ILP Integer Linear Programming
IP Internet Protocol
IRO Include Route Object
ITU-T International Telecommunication Union
IV Impairment Validation
LCoS Liquid-Crystal-On-Silicon
LMP Link Management Protocol
LS Label Set
LSA Link State Advertisement
LSC Lambda-Switch-Capable
LSP Label Switched Path
LSPDB LSP-DataBase

LSR Label Switched Router
MEMS Microelectromechanical systems
MILP Mixed Integer Linear Programming
MPLS Multiprotocol Label Switching
MPLS-TE Multiprotocol Label Switching—Traffic Engineering
MZM Mach Zehnder Modulator
NMS Network Management
NRZ Non-return-to-zero
NWDM Nyquist WDM
OADM Optical Add and Drop Multiplexer
ODU Optical channel Data Unit
OE Opto-electronic
OFDM Orthogonal Frequency Division multiplexing
OFP OpenFlow Protocol
OOK On-off-keying
OSNR Optical SNR
OTN Optical Transport Network
OTN Optical Transport Network
OTU Optical Transport Unit
OXC All-Optical Switch
PCE Path Computation Element
PCEP Path Computation Element Protocol
PCReq Path Computation Request
PDM Polarization Division Multiplexing
PDM Polarization-Division-Multiplexing
PDS Processamento Digital de Sinais
PM Polarization Multiplexing
PMD Polarization Mode Dispersion
PSK Phase Shift Keying
QAM Quadrature Amplitude Modulation
QoS Quality of Service
QoT Quality of the Transmission
QPSK Quadrature Phase Shift Keying
ROADM Reconfigurable OADM
RSA Routing and spectrum allocation
S-BVT Sliceable BVT
SBVT Sliceable Bit Rate Variable Transponders

SDN Software-Defined Network
SNR Signal-to-noise ratio
TCP Transport Control Protocol
TDM Time-division multiplexing
TE Traffic Engineering
TED Traffic Engineering Database
TFP Time Frequency Packing
WDM Wavelength Division Multiplexing
WSON Wavelength Switched Optical Network
WSS Wavelength Selective Switch
XRO Exclude Route Object

Resumo

O crescimento do tráfego de Internet, e o esgotamento do espectro disponível, motivou a busca por métodos para gerenciar o espectro de maneira mais eficiente e como preenche-lo ao máximo com sinais ópticos. Nesse sentido, a Rede Óptica Elástica é uma solução que apresenta grande potencial, proporcionando melhor aproveitamento do espectro disponível. Nesse trabalho é estudado o conceito de Rede Óptica Elástica, com ênfase na alocação do espectro de canais flexível e adoção de slots de frequência com tamanho menor que o padrão atual, bem como esse paradigma se adapta às condições da rede para realizar a transmissão. As Redes Ópticas Elásticas se tornam possível com a implementação do *Bandwidth Variable Transponder*, o qual possui destaque ao decorrer do texto, assim como o processamento digital de sinais e a arquitetura dos nós, conceitos de grande relevância neste propósito. Por fim são feitas considerações sobre plano de controle e como eles gerenciam os recursos das redes. A base para este estudo é o livro editado por Victor López e Luis Velasco, *Elastic Optical Networks, Architecture, Technologies and Control* (Springer, 2016), que apresenta os conceitos abordados de forma mais aprofundada.

Palavras-chave: Redes Ópticas Elásticas, *Dense Wavelength Division Multiplexing*, *Bandwidth Variable Transponders*, *Sliceable Bandwidth Variable Transponders*, *Flexgrid*, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

Abstract

The growth of Internet traffic, and the depletion of available spectrum, has motivated the search for methods of managing the spectrum more efficiently and how to fill it with optical signals to the fullest. In this sense, Elastic Optical Network is a solution that presents great potential, providing better use of the available spectrum. In this work the Elastic Optical Network concept is studied, with emphasis on the allocation of flexible channel spectrum and adoption of frequency slots smaller than the current standard, as well as this paradigm adapts to the network conditions to perform the transmission. The implementation of Elastic Optical Networks becomes possible with the implementation of the Bandwidth Variable Transponder, which has a prominence throughout the text, as well as digital signal processing and node architecture, concepts of great relevance in this purpose. Finally, considerations are made about the control plan and how they manage network resources. The basis for this study is the book edited by Victor López and Luis Velasco, *Elastic Optical Networks, Architecture, Technologies and Control* (Springer, 2016), which presents the concepts discussed in more depth.

Key-words: Elastic Optical Network, Dense Wavelength Division Multiplexing, Bandwidth Variable Transponders, Sliceable Bandwidth Variable Transponders, Flexgrid, Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Capítulo 1 Introdução

1.1 Motivação

A indústria de telecomunicações tem acompanhado o aumento da demanda de largura de banda ano após ano. Esse crescimento é de aproximadamente 30% para o tráfego baseado em Internet [1]. Esse cenário deve permanecer pelos próximos anos por diversos motivos dentre os quais destacam-se:

- Proliferação de aplicações que requerem largura de banda muito alta. Como a Internet se tornou o meio mais comum para o consumo de vídeo, aumentando a demanda de vídeos em alta definição e aplicações em nuvem que devem aumentar a demanda de largura de banda com a mesma intensidade.
- Fibra e outras fontes de acesso de largura de banda. Existem planos para aumentar a quantidade de instalações de fibra (*Fiber to the Premises*), ou seja, crescimento do acesso à banda larga a clientes residenciais.

Esses dois pontos mostram a tendência que os consumidores terão acesso a um leque de serviços de banda larga e a capacidade de acessar esses recursos. Naturalmente, um dos efeitos é que o crescimento do tráfego da rede *IP* continuará e possivelmente acelerará. Entretanto, acredita-se que o trânsito não só aumentará, mas também se tornará muito mais dinâmico, tanto no tempo, mas também em roteamento. Neste cenário, são previstas grandes mudanças na magnitude do trânsito durante um período de 24 horas, já que os usuários diurnos, os quais tratam de negócios, e têm demandas e requisitos muito diferentes em relação aos clientes residenciais, e são considerados noturnos. Além disso, como há vários provedores de conteúdo e serviços em nuvem, o tráfego do fluxo também se tornará dinâmico.

No futuro as redes deverão fornecer conectividade entre roteadores *IP* com uma ampla gama de larguras de banda, algumas das quais serão muito maiores do que as atuais além de que serão muito mais dinâmicas no tempo e no fluxo. A atual solução utiliza o *Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)* a qual disponibiliza transponders cuja taxa mais comum de operação é de 10 Gb/s [2]. No entanto, o atual limite de 10 Gb/s \times 80 comprimentos de onda oferecem apenas 800 Gb/s por link, tornou-se insuficiente para atender a demanda de serviços. A solução imediata adotada na última década foi atualizar a tecnologia do transponder para 40 e 100 Gb/s. Neste contexto, em alguns casos, as redes passaram a operar com taxas de linha carregadas numa mesma fibra óptica. Atualmente, embora taxas de 100 Gb/s satisfaçam às necessidades de curto a médio prazo, o crescimento previsto do tráfego aponta para a necessidade de implantação

de transponders fornecendo taxas de 400 Gb/s e 1 Tb/s. À medida que isso ocorre, espera-se que o uso de taxas de linha mista se torne mais popular.

Os sistemas *DWDM* existentes dividem o espectro óptico da banda C, centrada com 1550nm e com largura típica de 35nm, em bandas discretas, espaçadas por 50, e padronizadas pela *ITU* (*International Telecommunication Union*). Um transponder fornece um comprimento de onda individual que traz uma demanda do cliente e é acomodada em apenas uma dessas bandas. Esta abordagem é flexível de duas formas distintas:

- O transponder tem uma taxa de bits fixa, 10 ou 40 Gb/s
- O espectro de cada sinal de comprimento de onda não pode ultrapassar o espaçamento da grade fixa da *ITU* utilizada no sistema. O sistema normalmente possui dispositivos sensíveis ao comprimento de onda, tais como multiplexadores e demultiplexadores ópticos que operam utilizando a grade fixa e filtram qualquer sinal com espectro que atravesse os limites da grade fixa

A Figura 1.1 mostra uma gama de demandas com diferentes larguras de banda, sendo instalada em uma rede fixa. Algumas das bandas cabem confortavelmente entre os limites da grade de 50 GHz, enquanto outras (rosa e laranja) possuem largura espectral maior. Os filtros ópticos, especificados na rede fixa da *ITU*, impõem grandes penalidades de filtragem como mostrado na Figura 1.1.

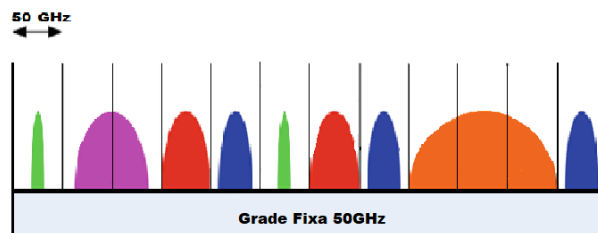


Fig. 1.1 Impacto do filtro de grade fixa em grandes demandas de largura de banda. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

Isso significa que a rede *DWDM* resultante é parcialmente incapaz de suportar essas demandas de largura de banda. Uma mudança para suportar essa demanda, é por exemplo, instalar outros transponders para lidar com demandas adicionais, no entanto este é um processo muito lento. Além disso, quaisquer transponders com taxa de bits muito alta, como 400 Gb/s e acima, possuem um espectro óptico muito amplo e são muito grandes para serem suportados por esse padrão de espaçamento. Portanto, grandes demandas de largura de banda terão de ser divididas para que possam ser transportadas pela grade fixa. Isso resulta em um uso altamente ineficaz da capacidade da rede e conseqüentemente em redes de múltiplas camadas. Será necessário instalar uma grande quantidade de equipamentos *IP/MPLS* que acarretam grande aumento nos custos de implantação e operação das redes.

Se houvesse uma solução mais simples, barata, flexível e dinâmica do que a taxa de linha mista, transponders fixos, esta seria uma alternativa muito atraente. As *Elastic Optical Networks (EON)* são capazes de cumprir os requisitos em termos de capacidade e dinamismo das futuras redes, combinando duas tecnologias: transponders e comutação *flexgrid*.

1.2 Objetivo

Esse projeto tem como objetivo estudar a evolução da *WDM* para *Elastic Optical Networks*, bem como as novas aplicações que os *EONs* podem suportar. O planejamento de *EONs* é apresentado, incluindo sua modelagem matemática e algoritmos. A partir da perspectiva do plano de dados, os avanços da transmissão no *EON* serão detalhados, abrangendo os *Bandwidth Variable Transponders*, a análise e atenuação de deficiências físicas e as arquiteturas de nó. Será apresentado a arquitetura do *GMPLS* e do *OpenFlow*, como também o *SDN (Software-Defined Networking)* pode aproveitar os recursos do *EON*.

1.3 Organização do Trabalho

Essa monografia é dividida em 10 capítulos. O primeiro capítulo introduz o tema, além das motivações e objetivo deste trabalho. O capítulo 2 apresenta a situação atual das redes e os conceitos básicos das *Elastic Optical Networks*. O capítulo 3 une os conceitos e ilustra o funcionamento através de um exemplo. No capítulo 4, um conceito básico para qualquer rede, o roteamento e a alocação do espectro. O Processamento Digital de Sinais, os conceitos e os métodos aplicados nas *EON* serão abordados. Um estudo sobre a arquitetura dos nós, os requisitos e qualidades serão abordados no capítulo 6, e no capítulo 7 um novo dispositivo, o *Sliceable Bandwidth Variable Transponder* é apresentado, acompanhado de considerações sobre as suas vantagens. Nos capítulos 8 e 9, *GMPLS* e o *SDN*, os quais são conceitos chave para aproveitar o potencial das *EONs*. No capítulo 10, considerações sobre o assunto abordado e as conclusões são apresentadas.

Capítulo 2 Evolução para Redes Ópticas Flexgrid

Até recentemente, o grande espectro disponível fornecido pela fibra óptica foi mais que o suficiente para atender às demandas por serviços e aplicações. Adicionar mais dados a uma fibra era uma simples questão de adicionar comprimentos de onda, levando em conta que, em níveis de potência baixos, vários comprimentos de onda podem ser suportados na mesma fibra sem interagirem entre si. Recentemente, o crescimento no tráfego de Internet resultou no esgotamento deste espectro [2], motivando a busca por métodos de gerenciamento do uso do uso do espectro de maneira mais eficiente e como preencher o espectro com sinais ópticos ao máximo.

2.1 A História das Grades ITU e Evolução para Flexgrid

As fibras ópticas são amplamente implantadas em comunicações de fibra óptica, por permitirem a transmissão por longas distâncias e em larguras de banda mais altas (taxas de dados) do que os cabos de fio. Essas propriedades se devem as menores perdas e maior número de canais que podem ser transportados simultaneamente pelo amplo espectro disponível.

Nas fibras ópticas, a região entre 1,3 e 1,6 μm é reservada para transmissões. Dentro desta região, a banda C apresenta as menores perdas de todo o espectro e é explorada para transmissão em distâncias muito longas. A banda C se refere aos comprimentos de onda entre 1525nm (ou a frequência de 195,9 THz) e 1565nm (191,5 THz). A *Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)* é a tecnologia que permite a transmissão de um número de portadores de sinal óptico para uma única fibra óptica, utilizando diferentes comprimentos de onda. O *International Telecommunication Union Telecommunication Standardisation Sector (ITU-T)* definiu uma tabela com todos os comprimentos de onda e respectivas frequências centrais. Os comprimentos de onda DWDM foram posicionados em uma grade com exatamente 100 GHz (cerca de 0,8 nm) de espaçamento na frequência óptica, com uma frequência de referência fixada em 193,10 THz (1552,52 nm) [3].

Aumentar a taxa de bits de uma portadora além de 100 Gb/s requer o uso do formato de modulação de alta ordem, por exemplo, 16-*QAM* a qual duplica a taxa de bits comparada ao *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)* e fornece capacidade de 200 Gb/s. No entanto, esses formatos *QAM* mais altos só funcionam em distâncias de transmissão mais curtas. Uma maneira de implementar canais de taxa mais alta, como 400 Gb/s e 1 Tb/s, ocorre pela adoção de multiportadoras. Por exemplo, um canal de 400 Gb/s pode ser obtido com duas subportadoras moduladas por 16-*QAM* (200 Gb/s cada), cada uma em 37,5 GHz, para um total de 75 GHz de largura de banda; e um canal de 1 Tb/s pode ser obtido com quatro subportadoras moduladas 32-*QAM*, cada uma dentro de 43,75 GHz, para uma largura de banda total de 175 GHz. Uma consequência desta implementação é a necessidade de um maior espaçamento de canal, quebrando o padrão de 50 GHz por canal.

Tornou-se necessário criar um novo padrão de espaçamento que permitisse melhorar a eficiência espectral e assim atender os novos requisitos de espectro. Abordando essa questão, o ITU-T propôs uma grade mais estreita associando um slot de frequência a uma conexão óptica, chamada de grade de frequência flexível, ou mais comumente *flexgrid*. A grade flexível (*flexgrid*) permite a atribuição de um número variável (n) de slots de tamanho fixo a um canal óptico em função de seus requisitos. Um slot mede 12,5 GHz, permitindo a transmissão de canais de 100 Gb/s em 37,5 GHz ($n = 3$), em vez de 50 GHz no caso da grade fixa.

A Figura 2.1 mostra o impacto da *flexgrid* na transmissão. Neste exemplo, o *flexgrid* é capaz de suportar 8 em vez de 6 canais de 200Gb/s, e além disso é capaz de agrupá-los em supercanais caso seja necessário, que pode ser transportado como uma única entidade.

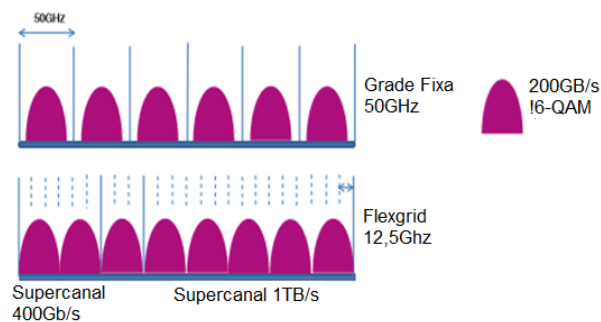


Fig 2.1: A padronização de 12,5GHz para flexgrid permite um empacotamento mais próximo dos canais. Concatenação permite a criação de um supercanal de 400Gb/s e 1Tb/s. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

2.2 Arquiteturas DWDM de grade fixa

A Figura 2.2 ilustra um sistema *DWDM*, onde múltiplos canais de comprimento de onda são gerados em transmissores ópticos, cada um sendo modulado por um sinal de dados e combinados por um multiplexador *WDM*. O sinal *DWDM* composto é então transmitido através de uma fibra óptica com amplificadores para impulsionar o sinal de transmissão, compensando a perda da fibra em cada intervalo, bem como para melhorar a limitação do receptor. Na extremidade receptora, um demultiplexador *DWDM* é usado para separar o sinal *DWDM* em canais individuais e os sinais de dados são recuperados nos receptores ópticos.

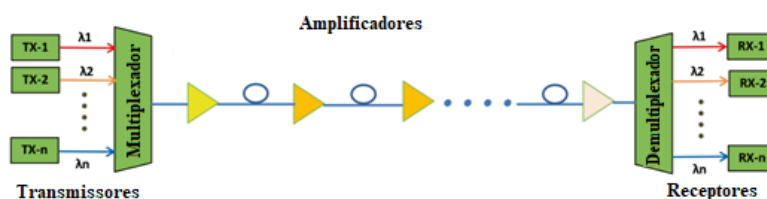


Fig 2.2: Esquemático de um sistema *DWDM*. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

A tecnologia *DWDM* fornece uma maneira de aumentar a capacidade da rede. Enquanto a capacidade aumenta de acordo com o número de canais *DWDM*, a infraestrutura de rede, incluindo fibras ópticas, amplificadores ópticos, multiplexadores e demultiplexadores *DWDM*, é compartilhada por todos os canais de *DWDM*, compartilhado também o custo da rede, resultando em menor custo por canal. Além disso, a tecnologia *DWDM* é transparente para os sinais de dados transportados nos canais. Portanto, novas taxas de dados e formatos de modulação podem ser introduzidas para aumentar ainda mais a capacidade da rede.

A Tabela 2.1 mostra a capacidade total de fibra usando *DWDM* em uma grade de 50 GHz. Para sistemas *DWDM* comerciais, a capacidade total de fibra aumentou ao longo dos anos de até 0,24 Tb/s em uma taxa de dados de 2,5 Gb/s para um total de 9,6 Tb/s na taxa de dados mais alta de 100 Gb/s, além da melhoria da eficiência espectral de 0,05 a 2 bit/s/Hz quando a taxa de dados aumenta para 100 Gb/s.

Data Rate (Gb/s)	Capacidade Total (Tb/s)			Eficiência Espectral (bit/s/Hz)
	80 λs	88 λs	96 λs	
2,5	0,2	0,22	0,24	0,05
10	0,8	0,88	0,96	0,2
40	3,2	3,52	3,84	0,8
100	8	8,8	9,6	2

Tabela 2.1: Capacidade total da fibra usando *DWDM* com grade de 50GHz.

A tecnologia *DWDM* também evoluiu para redes *DWDM* com comutação de comprimento de onda, inicialmente com *Optical Add and Drop Multiplexers (OADM)*, e mais recentemente com os *Reconfigurable OADM (ROADM)*, que pode ser configurado remotamente. Na Figura 2.3 é ilustrado uma rede *WDM* baseada em *ROADM* nos nós *WDM*, na qual os *ROADMs* direcionam canais para diferentes rotas ou para portas *ADD/DROP* locais. À medida que a largura de banda continua aumentando, as redes *WDM* baseadas em *ROADM* fornecem maior flexibilidade na adição de novos comprimentos de onda ou redirecionamento dos mesmos, bem como na restauração do tráfego quando ocorre uma falha.

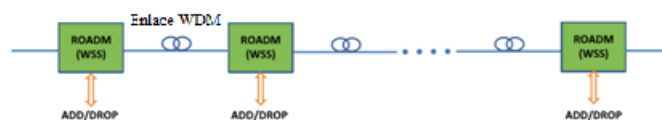


Fig 2.3: Rede *WDM* baseada em *ROADM*. Adaptado de *Elastic Optical Networks [2]*

2.3 Wavelength Selective Switch (WSS)

Uma tecnologia que sustenta o surgimento das arquiteturas *flexgrid* é o WSS, com a funcionalidades de comutação e roteamento de comprimento de onda. Esse componente normalmente possui uma única entrada de fibra contendo muitos sinais de comprimento de onda. Sua função é direcionar esses comprimentos de onda para qualquer número de saídas de fibra sem quaisquer restrições, qualquer combinação dos comprimentos de onda de entrada pode ser redirecionada para qualquer uma das saídas de fibra.

Tal componente é de grande importância para a rede WDM de grade fixa, nesse caso o WSS é baseado em *Microelectromechanical systems* (MEMS). Já as redes *flexgrid* requerem maior flexibilidade pelo controle de largura de banda, resolução espectral mais fina, e filtragem. Com as tecnologias baseadas em cristais líquidos amadurecendo, o princípio holográfico passou a oferecer filtragem de banda flexível em conjunto com as funcionalidades de comutação e roteamento de comprimento de onda necessárias para um WSS de grade flexível. O componente chave dentro do WSS é um dispositivo *Liquid-Crystal-On-Silicon* (LCoS), responsável pela comutação e o direcionamento da luz.

As funcionalidades que um WSS de *flexgrid* baseado em LCoS holográfico inclui [2]:

- Roteamento e comutação de múltiplos comprimentos de onda
- Equalização de potência de diferentes canais de comprimento de onda
- Compensação/atenuação de dispersão
- Larguras de banda de canal variável
- Operação independente de polarização
- Tempos de reconfiguração de milissegundos.

A Figura 2.4 indica como o dispositivo LCoS WSS opera. O sinal WDM de uma fibra de entrada é colimada por uma lente e projetada em uma grade de difração fixa, que distribui espacialmente as diferentes cores (componentes de frequência) do sinal composto para que eles sejam visualizados em diferentes locais do dispositivo LCoS. Isso exibe um holograma em cada local com as frequências de luz separadas (por suas cores). Cada holograma é configurado para atuar como grade de difração programável, para direcionar seletivamente a luz até a porta de saída necessária. Ao fazê-lo, para cada cor em particular, o holograma pode ajustar a potência no sinal óptico e também pode compensar ou atenuar qualquer degradação de dispersão sofrida pelo sinal.

O LCoS é um dispositivo pixelizado, onde uma matriz de cristal líquido é colocada em uma superfície plana e refletora, que por sua vez está localizado diretamente acima de um substrato de processamento baseado em CMOS, para permitir o endereçamento eletrônico individual de cada pixel.

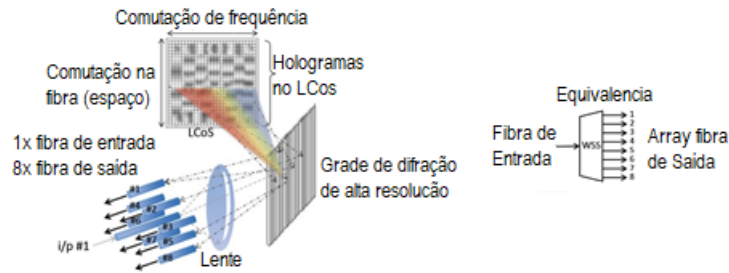


Fig. 2.4 Esquema do Wavelength Selective Switch. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

Como um supercanal contém uma ampla largura, quando o supercanal é apontado para o dispositivo *LCoS*, é necessário que uma largura ampla, ou seja, um maior número de pixels seja processado. É nesse ponto que a flexibilidade do WSS se torna importante, pois para uma largura de banda variável de um supercanal de grade flexível, é fácil atribuir mais linhas da matriz *LCoS* conforme necessário, para direcionar corretamente todo o supercanal *flexgrid* para a porta de saída desejada, sem quaisquer limitações de largura de banda.

2.4 Arquiteturas ROADM

Um *ROADM* é um elemento de rede que permite adicionar ou remover dinamicamente comprimentos de onda em um nó da rede, além de serem capazes de alternar comprimentos de onda *DWDM* entre fibras. Esses dois caminhos possíveis para o tráfego em um *ROADM* são mostrados na Fig. 2.5, o primeiro o tráfego que atravessa o nó e o outro é o caminho *add/drop* para o tráfego que termina ou se origina no nó.

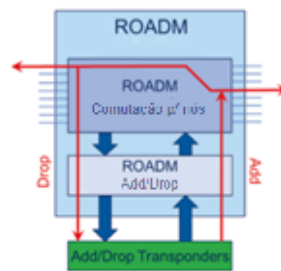


Fig. 2.5 Tráfego em um ROADM. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

Os *ROADMs* podem ser construídos usando uma variedade de tecnologias, sendo as arquiteturas baseadas em WSS as mais usuais. Embora as arquiteturas *ROADM* baseadas em WSS tenham resolvido em grande parte o problema de como trocar comprimentos de onda entre fibras atravessando um nó, elas não resolveram os problemas com o aumento da flexibilidade ao adicionar e remover canais. Esta flexibilidade foi abordada pelos projetos contenção sem cor (*C/D/C* – “*Colourless Directionless Contentionless*”):

- As arquiteturas incolores permitem que qualquer comprimento de onda em uma fibra seja conectado a qualquer transponder (ou grupo de transponders) de adição/remoção associada a essa fibra.
- As arquiteturas *ROADM* incolores e sem direção estendem esse conceito ao compartilhamento de um único grupo de transponders entre todos os comprimentos de onda de todas as direções expressas de fibra.
- “Sem Contenção”: Como muitas arquiteturas C/D propostas possuem algum bloqueio de cores e um caminho era necessário para distinguir arquiteturas que realmente não bloqueiam das que bloqueiam.

2.5 Desempenho de Redes Fixas e Flexgrid

A maioria das redes ópticas multiplexava seu tráfego em diferentes comprimentos de onda modulados a uma taxa fixa. Com cada comprimento de onda capaz de suportar taxas de dados cada vez mais altas (100 Gb/s) e com conexões que exigem apenas uma fração da capacidade do canal óptico, foi possível a agregar vários serviços de baixa taxa no mesmo circuito óptico. Essas operações de agrupamento são custosas e consomem energia, pois são realizadas por dispositivos e roteadores optoeletrônicos, onde os preços dos roteadores aumentam quadraticamente com seu tamanho [4], e quanto mais fina for sua granularidade, mais energia eles consomem e maior é o preço [5].

Melhorias nas técnicas e dispositivos de transmissão possibilitaram evitar conversões optoeletrônicas sistemáticas nos nós intermediários. Uma rede óptica que permite o *by-pass* óptico em conexões intermediárias é chamada de transparente, ao contrário de redes opacas, onde são realizadas conversões sistemáticas optoeletrônicas (OE), logo o melhor compromisso em termos de custo e consumo de energia é obtido com o *by-pass* óptico [6]. Embora interfaces de alta taxa de dados estejam se tornando muito atraentes devido à sua enorme capacidade, é preciso considerar que seu alcance transparente diminui com o aumento da taxa de dados, e isso pode aumentar as conversões de OE. Para melhorar o preenchimento de canais ópticos e atualizar a capacidade da rede sem aumentar o custo de rede por bit transportado, vários estudos, demonstram a ineficiência de transportar esse tráfego com equipamentos optoeletrônicos operando em uma única taxa de dados e provando que a migração para redes ópticas com infraestruturas que suportam diferentes taxas de dados [7] otimiza o custo de uma rede.

Em [8], o uso de diferentes taxas de dados para lidar com o aumento do tráfego em uma rede nacional é estudado. A escolha de uma taxa de dados específica associada a uma nova conexão e considerando tanto a capacidade quanto a distância a percorrer, provando que a combinação de taxas de dados gera uma solução econômica e uma utilização eficiente dos

recursos. Em [7], uma rede óptica usando três diferentes formatos de modulação, cada um adaptado a uma dada taxa de dados (10, 40 e 100 Gb/s) é comparado a uma rede com uma única taxa de dados e com múltiplas taxas de dados, mas com apenas um formato de modulação. A combinação de taxas de dados e formatos de modulação permite uma redução média do custo da rede em até 15%. Em [9], é mostrado que a combinação de taxas de dados também reduz o consumo de energia de uma rede de transporte óptico de 10% até 77%, dependendo da taxa de dados fixa considerada.

Uma preocupação vem do uso de transponders de grade fixa com diferentes taxas de dados, o desempenho é maximizado (alcance transparente) mas bloqueia qualquer mudança depois que o equipamento foi instalado, exigindo uma previsão precisa sobre a evolução do tráfego. De fato, as redes que combinam os canais de 10 e 100 Gb/s tem melhor desempenho do que as redes de detecção direta que suportam apenas 2,5 e 10 Gb/s, mesmo com os canais de 100 Gb/s modulados em fase tendo a transmissão penalizada por interferências dos canais modulados em intensidade de 10 Gb/s [10].

Para enfrentar essas configurações ineficientes para uma rede, foi proposta a criação de redes ópticas “elásticas” nas quais um único tipo de transponder opera com várias taxas de dados, de acordo com as características como capacidade e degradação do sinal de cada conexão, proporcionando benefícios semelhantes às soluções de taxas mistas, mas com maior flexibilidade. Em geral, uma rede óptica elástica pode ser baseada em tecnologias *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* ou em *Polarization-Division-Multiplexed Quaternary Phase Shift Keying (PDM-QPSK)* de 100 Gb/s, variando os formatos de modulação e diminuindo suas taxas de dados.

Este conceito de redes elásticas está em conformidade com os sistemas baseados na grade de 50 GHz. Essa arquitetura de rede óptica elástica com taxa de dados flexível e alocação de espectro garantem alta eficiência de recursos, baixo custo e baixo consumo de energia. A principal vantagem destes sistemas vem de interfaces com taxas de dados adaptativas, aumentando o compartilhamento de recursos de uma rede, reduzindo o número total de interfaces em comparação com as redes de taxa fixa, permitindo reduzir o seu número em até 70%. Esse compartilhamento de interfaces diminui o custo da rede rapidamente, de acordo com o aumento da carga de tráfego. O uso de interfaces elásticas proporciona também o compartilhamento do espectro. Para atenuar o efeito prejudicial dos canais modulados em intensidade nos canais modulados em fase de 100 Gb/s, o espectro óptico pode ser particionado em bandas diferentes, embora isso possa impactar negativamente na disponibilidade do espectro.

As *Elastic Optical Networks* são mais econômicas que as arquiteturas simples quando a atualização de rede é levada em conta [11], por conta da flexibilidade dos transponders de largura de banda variável (*BVT*) se adaptando eficientemente às incertezas no crescimento do tráfego. Outra vantagem dos *BVTs* é a possibilidade de adaptar o consumo de energia da rede à

flutuação do tráfego. A adaptação da taxa de dados pode ser realizada adaptando o formato de modulação e a taxa de símbolos, separadamente ou em conjunto.

Até agora, apenas vantagens das redes elásticas com relação a grade fixa de 50 GHz foram consideradas, agora levamos em conta o *flexgrid*. Considere que um canal óptico é composto por um número variável de subportadoras, e cada subportadora tem uma taxa de símbolo e um formato de modulação que depende da distância a ser coberta e da taxa transmitida. Este conceito permite o uso de espectro suficiente (subportadoras), resultando em alta eficiência de espectro.

Na arquitetura baseada em *OFDM*, vários caminhos de comprimentos de onda (supercanais) são criados por meio de agrupamentos e a comutação é flexível no domínio do espectro, usando *BVTs*. O *BVT* aloca espectro suficiente para acomodar o tráfego de comprimento de onda (subportadoras), ou seja, particiona o espectro. O princípio da rede elástica é a possibilidade de se ajustar com eficiência a várias demandas de largura de espectro. Diversos canais *OFDM* podem ser mesclados em um supercanal, transportando um múltiplo da capacidade de um canal *OFDM* individual sem bandas de proteção. Essa arquitetura baseada em *OFDM* suporta taxas múltiplas (de Gb/s para Tb/s), maior eficiência de espectro por meio da alocação de espectro flexível de acordo com a taxa de dados transmitida (até 95% de melhoria de espectro comparado a uma rede *WDM* de rede fixa) [12].

Para alcançar alta eficiência espectral, o *BVT* precisa gerar um sinal óptico usando apenas recursos espectrais suficientes, de acordo com a taxa de dados do cliente e as condições do canal. Para um canal *OFDM*, é criado um canal que ajuste o número de suas subportadoras e sua taxa de modo a lidar com os requisitos de serviço. O controle do número de subportadoras pode ser realizado no domínio óptico ou digital, dependendo do tipo de método de síntese de sinal usado. A eficiência espectral do supercanal dependerá: da taxa associada a cada subportadora, do espaçamento entre elas e da distância que deve ser percorrida pelo supercanal, quanto menor, mais estreito o espaçamento que pode ser adotado.

No entanto, as funções de filtragem não são ideais e quanto mais estreitas as granularidades de filtragem de um *ROADM*, maiores são as penalidades de filtragem sugerindo o uso de uma banda de guarda separando os canais *OFDM* para minimizar as penalidades devidas às funções de filtragem. Obviamente quanto maior o valor da banda de guarda, menores são as vantagens das redes flexíveis em relação à rede fixa.

2.6 Migração para o Flexgrid

Estudos recentes mostram que o tráfego esperado para curto e médio prazo) não são suficientes para justificar a implantação imediata da rede flexível. É estimado em [13] que a exaustão de capacidade na rede fixa atual não ocorrerá antes de 2019, como também concluiu que

a capacidade atual de espectro operando com *ROADMs flexgrid* poderia estender o tempo de vida da rede.

O cenário mais provável é que alguns links na rede cresçam mais rapidamente do que outros e fiquem congestionados, agindo como gargalos para o crescimento futuro da rede. É nesses links em que o *flexgrid* pode ser implantado pela primeira vez para prolongar o tempo de vida da rede. Portanto, é necessária uma estratégia de migração para que novas tecnologias possam ser introduzidas onde elas tenham mais benefícios.

O esgotamento de capacidade não é a única motivação por trás da migração. Existem outros fatores que justificam a implantação gradual da tecnologia de grade flexível:

- No curto prazo, o uso de taxas de bits mais altas e formatos avançados de modulação para conexões específicas permitirá sinais de 400 Gb/s.
- A médio prazo, o advento dos *Sliceable Bandwidth Variable Transponders (SBVTs)* aumentará o alcance das áreas de *flexgrid* para aquelas partes onde, embora o espectro ainda não esteja esgotado, a capacidade de dividir vários fluxos será benéfica.
- No longo prazo, a exaustão de capacidade como resultado de lidar com volumes de tráfego esperados de centenas Tb/s exigirá implantar *flexgrid* na rede. O equipamento de rede fixa seria então completamente atualizado para o *flexgrid* desde o núcleo.

Capítulo 3 Conceitos das Redes Ópticas Elásticas

Basicamente, temos dois objetivos: esclarecer o modo de operação da *EON* e depois explicar a utilidade desse modelo.

3.1 Flexgrid e EON

É comum os termos “flexgrid” e *EON* serem empregados a sistemas que não estão em conformidade com o espaçamento de canais de rede fixa da *ITU-T*. As *EON* diferenciam-se do espaçamento dos canais de fixos de 50 GHz em duas restrições tecnológicas dos sistemas *WDM* antigos: (a) o uso de não retorno a zero (*NRZ*) e o chaveamento on-off (*OOK*) como o formato primário de modulação, e (b) a dificuldade de separar as larguras de banda espectrais em toda a banda C na terceira janela de atenuação da fibra de sílica. A implementação de sistemas *NRZ OOK* a taxas de dados de 10 Gb/s e superiores, vem acompanhada das limitações de canal, como as não linearidades de dispersão e da fibra, e sistemas *WDM* necessitam de um espaçamento de canal que seja pelo menos 2 a 3 vezes a largura de banda óptica do canal, para garantir isolamento óptico suficiente para adicionar/remover canais (*add/drop*).

As *EONs* superam essas limitações, observa-se na Figura 3.1 que na *EON* a largura de banda do canal pode ficar mais estreita ocupando menos largura de banda e/ou a frequência central de um canal pode ser deslocada, mas há sempre um passo espectral, associado às limitações da tecnologia de demultiplexação óptica. Este passo espectral é uma fração inteira do espaçamento padrão de grade de 100 GHz, por exemplo 6,25 ou 12,5 GHz. Além disso, o termo “flexgrid” é menos preciso ao descrever a essência desses sistemas, uma vez que, é a largura de banda óptica do canal que varia, e essa largura de banda é mais eficientemente explorada em *EONs* por causa das grades estreitas usadas.

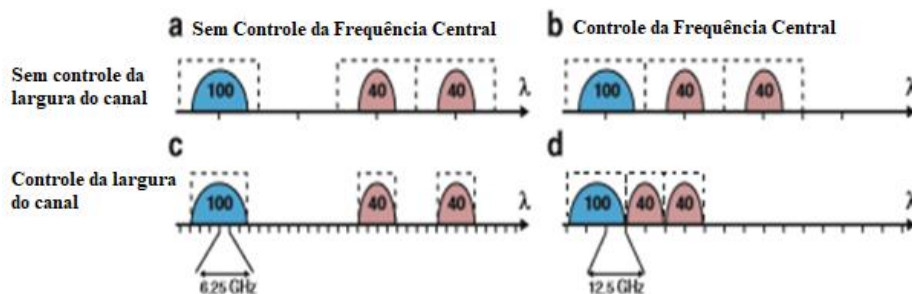


Fig. 3.1 WDM sob grade ITU-T e modos de operação EON. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

A *ITU-T* define os seguintes termos [14]:

- **Grade de frequência:** É um conjunto de frequências usadas para indicar as frequências centrais nominais permitidas que podem ser usadas para definir aplicações.
- **Slot de frequência:** O intervalo de frequência alocado a um slot e indisponível para outros slots em uma grade flexível. Um slot de frequência é definido por sua frequência central nominal e sua largura de slot.
- **Largura do slot:** A largura total de um slot de frequência em uma grade flexível.

Para DWDM de grade flexível, os slots de frequência permitidos têm uma frequência central nominal em uma grade de 6,25 GHz em torno da frequência central de 193,1 THz e uma largura de slot em múltiplos de 12,5 GHz, como visto na Fig. 3.1. Qualquer combinação de slots de frequência é permitida desde que não haja sobreposição de dois slots de frequência.

3.2 Exemplo de operação de uma EON

Para esclarecer as propriedades das *EONs*, é necessário introduzir os seguintes conceitos:

- **Taxa de transmissão:** é a taxa de símbolos gerados na fonte e, aproximadamente, igual à largura de banda eletrônica do sistema de transmissão. A taxa de transmissão é um importante parâmetro de desempenho do sistema dependente de tecnologia. Este parâmetro define a largura de banda óptica do transponder e especifica a largura mínima do slot requerida para os fluxos correspondentes.
- **O formato de modulação:** Para uma dada taxa de transmissão, o formato de modulação define o número equivalente de bits de cada símbolo que está transportando.
- **A taxa de linha:** Efetivamente, é a taxa de informação usada para o transporte do fluxo entre um nó de origem e um nó de destino.

Considere um sistema com uma taxa de transmissão de 50 G símbolos/s, em que o formato de modulação QPSK é usado, o que corresponde a 2 bits/símbolo. A taxa de linha equivalente é de 100 Gb/s e a largura de banda do sistema é de 50 GHz. As duas polarizações são moduladas simultaneamente, a taxa de linha de cada portadora seria de 200 Gb/s. Dada a granularidade de largura de slot de 12,5 GHz, o slot de frequência pode chegar a 50 GHz. Na prática, o slot de frequência pode ser maior, com largura de banda adicional alocada em cada lado do sinal, garantindo isolamento óptico para facilitar adição/remoção em nós intermediários. A faixa de proteção necessária para sistemas baseados em *LCoS*, 12,5 GHz de cada lado do sinal é suficiente.

Uma grande diferença de *EONs* para redes *WDM* originais é a seguinte: Suponha que há a necessidade de transportar um fluxo de 1 Tb/s. Considerando o exemplo anterior, é necessário 5 portadoras de 200 Gb/s. Neste caso, quando múltiplos fluxos são gerados e transportados como

uma única entidade (supercanal) do nó de origem para o nó de destino, sem adição/remoção em nós intermediários, as 5 portadoras não precisam ter bandas de guarda para separar os subcanais. Isso faz parte do conceito das *EONs*, onde conectividade é negociada por taxa de linha. Na Figura 3.2 observamos que existem 5 portadoras que transportariam 200 Gb/s cada. Na Fig. 3.2a estas portadoras são usadas para conectar o nó A aos outros quatro nós: de A a D por meio de duas portadoras independentes produzindo um total de 400 Gb/s, A para G com uma portadora suportando 200 Gb/s, de A a E com uma portadora suportando 200 Gb/s, e de A a F com outra portadora suportando 200 Gb/s. Por outro lado, como mostrado na Fig. 3.2b, as cinco portadoras são usadas para interconectar apenas o nó A ao nó C, mas desta vez com um supercanal a uma taxa agregada de 1 Tb/s. Neste último caso, nenhuma banda de guarda é necessária para separar as 5 portadoras, enquanto no caso da Fig. 3.2a, o portador direcionado para os nós F e as portadoras direcionadas para o nó D precisam ter bandas laterais de guarda por serem opticamente conectados nos nós de trânsito E e B, C, respectivamente.

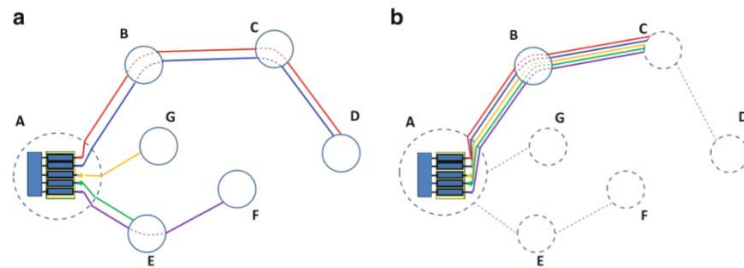


Fig. 3.2 A troca entre conectividade de nós e capacidade de link; (a) o grau de conectividade é 4 e (b) o grau de conectividade é 1. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

Uma *EON* não negocia apenas a taxa de linha por conectividade, mas também alcance óptico: dada uma taxa de transmissão, dependendo do formato de modulação, aumentando a taxa de linha, mas diminui o alcance óptico. Considere um nó de uma *EON*, como mostrado na Fig. 3.3

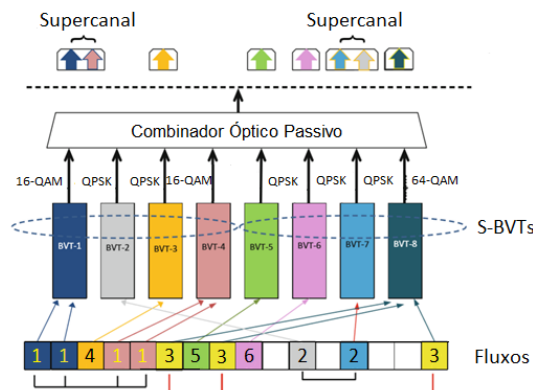


Fig. 3.3 Exemplo de nó com 8 BVTs particionados em dois S-BVTs. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

Nesse exemplo, o nó é equipado com dois transponders variáveis de largura de banda particionáveis (*SBVTs*) incorporando quatro *BVTs* cada um. Alguns fluxos de diferentes capacidades são decompostos pelos *SBVTs* (não mostrados na figura), para um número de fluxos em que todos fiquem na mesma taxa nominal (se forem do mesmo número). Por exemplo, há um grupo de quatro fluxos designado como “1”, um grupo de três fluxos designado como “7”, um grupo de dois fluxos designado como “6” e fluxos individuais designados como “2”, “4” e “5”. Os *BVTs* podem suportar diferentes formatos de modulação que tipicamente são QPSK, 16-QAM e 64-QAM, conforme ilustrado na Fig. 3.3. Para este fim, as seguintes seleções são feitas: os fluxos “2”, “4” e “5” são encaminhados para o BVT-3, BVT-5 e BVT-6, respectivamente, usando QPSK. Os três “7” são re-multiplexados construindo um fluxo de capacidade maior que é, então, encaminhado para o BVT-8 e, por essa razão, este BVT é agora modulado com 64-QAM. Finalmente, quatro “1” são multiplexados em dois fluxos maiores e são direcionados para BVT-1 e BVT-4, respectivamente, que são modulados com 16-QAM usando slots de frequência adjacentes e, neste caso, um Supercanal é formado. Os dois fluxos “6” não são multiplexados, eles são diretamente encaminhados para BVT-2 e BVT-7, empregando QPSK, formando novamente um supercanal. Finalmente, há mais quatro potenciais fluxos de entrada (mostrados em branco na Fig. 3.3) que não são utilizados, uma vez que não existem outros BVTs disponíveis.

Neste exemplo, identificamos as seguintes “negociações”: Os fluxos “7” são agrupados e direcionados para um único *BVT*, liberando *BVTs* para serem usados por outros fluxos. No nível de rede, isso equivale a adicionar recursos que seriam usados para obter maior conectividade no nó. No entanto, isso só é viável empregando um 64-QAM que reduz o alcance óptico. Se, por outro lado, se deseja aumentar o alcance óptico, os três fluxos “7” devem empregar o 16-QAM, mas isto é feito à custa de um BVT adicional, diminuindo os “recursos de conectividade” do nó em um grau. Para aumentar ainda mais o alcance óptico, os fluxos “2”, “4” e “5” estão usando o QPSK, diminuindo o grau de conectividade do nó ao usar slots de frequência maiores.

Para dar alguns resultados quantitativos, comparamos dois cenários na rede de 22 nós mostrada na Fig. 3.4, com caminhos transparentes de ponta a ponta, com a grade fixa e *EON*, respectivamente. O primeiro cenário assume uma matriz de tráfego uniforme, enquanto o segundo uma matriz de tráfego usando números aleatórios distribuídos uniformemente. O caso da grade fixa tem um espaçamento de canal de 50 GHz e usa transponders de 100 Gb/s, enquanto o caso *EON* como descrito acima, usa apenas modulações QPSK e 16-QAM e multiplexação de polarização (alcance de 2000 km e 500 km, respectivamente) com bandas de guarda de 25 GHz entre os supercanais. Supõe-se que cada link compreenda um único par de fibra onde 4 THz de largura de banda podem ser alocados. Neste caso, a capacidade máxima que pode ser transportada pela rede em cada caso foi calculada, usando o roteamento de caminho mais curto e o *first fit* para comprimento de onda/atribuição de espectro. Os resultados são mostrados na Fig. 3.5.

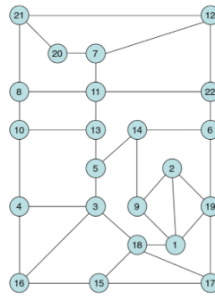


Fig. 3.4 Rede de 22 nós. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

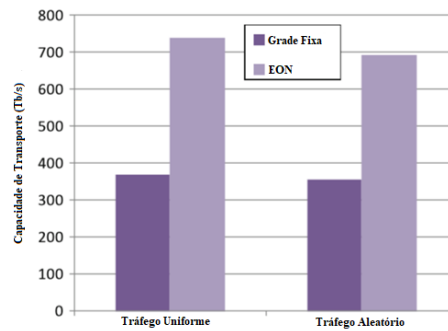


Fig. 3.5 Capacidade máxima transportada obtida para cada cenário para a rede fixa e o caso EON sobre a rede de 22 nós. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

A Figura 3.5 mostra que mesmo com essa abordagem simples, a EON dobra a capacidade transportada para ambos os cenários de matriz de tráfego, em comparação com o caso de rede fixa.

Capítulo 4 Roteamento e Alocação de Espectro

As demandas de tráfego precisam ser roteadas pela rede e uma parte do espectro óptico alocada a cada uma delas, criando os canais. O dimensionamento da rede consiste em determinar os nós e enlaces a serem instalados e determinar o equipamento necessário para atender ao tráfego previsto, minimizando o capital investido. Portanto o problema de roteamento e alocação de espectro, do inglês *Routing and Spectrum Allocation (RSA)* faz parte do problema de otimização que precisa ser resolvido.

4.1 Conceitos Básicos

Podemos definir o problema *RSA* em como encontrar um caminho óptico adequado, ou seja, uma rota e um ou um conjunto de slots, para cada demanda de um determinado conjunto, de modo que o número de slots atribuído garanta que a taxa de bits solicitada por cada demanda possa ser transportada.

RSA possui duas restrições: a de continuidade que garante os recursos espectrais alocados sejam os mesmos ao longo dos links na rota, e a restrição de contiguidade para garantir que esses recursos sejam contíguos no espectro.

Problema Básico de RSA

Um problema básico de *RSA* é encontrar um caminho para cada demanda em uma dada matriz de tráfego com o objetivo de minimizar ou maximizar algum objetivo. Várias alternativas para esse problema podem existir, por exemplo, podemos supor que todo o tráfego especificado pela matriz de tráfego precisa ser atendido ou algumas demandas devem ser bloqueadas. O problema pode ser formalmente declarado da seguinte maneira.

- Grafo conectado $G(N, E)$, onde N é o conjunto de locais e E é o conjunto de fibras ópticas conectando pares de locais
- Características do espectro óptico (largura do espectro e largura da fatia de frequência) e o conjunto dos formatos de modulação
- Matriz de tráfego D com a quantidade de taxa de bits trocada entre cada par de locais em N .

Saída: rota e alocação de espectro para cada demanda em D .

Objetivo:

- Minimizar a quantidade de taxa de bits bloqueada
- Minimizar a quantidade total de slots do espectro usadas

* Podemos considerar que as bandas de guarda são incluídas como parte do espectro solicitado.

O RSA pode ser modelado como apresentado logo abaixo, como a topologia é dada, podemos pré-calcular um conjunto de k caminhos distintos para cada uma das demandas na matriz de tráfego e , portanto, a formulação é geralmente conhecida como link-path (LP). Além disso, devido ao uso de slots pré-computados para cada demanda, chamamos essa formulação de Link-Path-Slot Assignment (LP-SA). Os seguintes conjuntos e parâmetros são definidos.

Topologia

N: Conjunto de locais, índice n

E: Conjunto de elos de fibra, índice e

Demandas e Caminhos

D: Conjunto de demandas, índice d . Para cada demanda d , a tupla $\{od, td, bd\}$ é dada, onde od e td são os nós de origem e destino, e bd é a taxa de bits em Gb/s

P: Conjunto de caminhos pré-computados, índice p

$P(d)$: Subconjunto de caminhos pré-computados para demanda d , $|P(d)| = k \forall d \in D$

r_{pe} : Igual a 1 se o caminho p usa o link e

Espectro

S: Conjunto de fatias de espectro, índice s

$C(d)$: Conjunto de slots pré-computados para demanda d

q_{cs} : Igual a 1 se o slot c usa fatia s

As variáveis de decisão são:

w_d : binário, igual a 1 se a demanda d não puder ser atendida

x_{dpc} : binário, igual a 1 se a demanda d for roteada através do caminho p e slot c

A formulação LP-SA é a seguinte:

$$(LP-SA) \min \sum_{d \in D} b_d * w_d \quad (4.1)$$

$$\sum_{p \in P(d)} \sum_{c \in C(d)} x_{dpc} + w_d = 1, \forall d \in D \quad (4.2)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{p \in P(d)} \sum_{c \in C(d)} r_{pe} \times q_{cs} \times x_{dpc} \leq 1, \forall e \in E, \forall s \in S \quad (4.3)$$

A função objetivo (4.1) minimiza a quantidade de taxa de bits que não são atendidas (rejeitada). A restrição (4.2) garante que um caminho seja selecionado para cada demanda, desde que a demanda seja atendida; caso contrário, a demanda não poderá ser atendida e, portanto, rejeitada. A restrição (4.3) garante que cada fatia em cada link seja atribuída a no máximo uma demanda.

Design de topologia como um problema de RSA

Assumindo que os links em E são suficientes para suportar a demanda da matriz de tráfego, mas nem todos são necessários para isso, conseqüentemente o novo objetivo é minimizar o número de links necessários para transportar toda a demanda. Como cada link instalado aumenta o investimento de capital na rede como resultado de interfaces ópticas, a minimização do número de links na topologia de rede resultante reduziria esse investimento. O problema pode ser formalmente declarado como segue:

Dado:

- Um gráfico conectado G (N, E)
- As características do espectro óptico e o conjunto de formatos de modulação
- Uma matriz de tráfego D

Saída:

- A rota e alocação de espectro para cada demanda em D
- Os links que precisam ser equipados

Objetivo: Minimizar o número de links a serem equipados para transportar a matriz de tráfego fornecida.

Uma vez que apenas parte dos links será instalada, o número de k rotas pré-computadas para cada demanda aumentaria muito para neutralizar o fato de que algumas das rotas se tornariam inúteis. Por essa razão, é usada uma formulação conhecida como node-link, que inclui cálculos de roteamento dentro do processo de otimização. Da mesma forma que antes, devido ao uso de slots pré-computados para cada demanda, chamamos essa formulação de *Node-Link Slot-Assignment* (NL-SA).

Um novo parâmetro foi definido:

g_{ne} igual a 1 se o link e é incidente ao nó n

As variáveis de decisão são:

x_{dec} binário, igual a 1 se a demanda d usar o slot c no link e

z_e binário, igual a 1 se o link e estiver instalado

A formulação NL-SA é a seguinte:

$$(NL-SA) \min \sum_{e \in E} z_e \quad (4.4)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C(d)} g_{ne} \times x_{dec} = 1, \forall d \in D, n \in \{o_d, t_d\} \quad (4.5)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C(d)} g_{ne} \times x_{dec} \leq 2, \forall d \in D, n \in N \setminus \{o_d, t_d\} \quad (4.6)$$

$$\sum_{\substack{e' \in E \\ e' \neq e}} g_{ne'} \times x_{de'c} \geq x_{dec}, \forall d \in D, \forall c \in C(d), n \in N \setminus \{o_d, t_d\}, \forall e \in E(n) \quad (4.7)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C(d)} q_{cs} \times x_{dec} \leq z_e, \forall e \in E, \forall s \in S \quad (4.8)$$

A função objetivo (4.4) minimiza a quantidade de links a serem instalados. Restrições (4.5), (4.6), (4.7) especificam o caminho para cada demanda. O caminho óptico para a demanda $d \in D$ é especificado pelos links $e \in E$ e o canal $c \in C(d)$ para o qual $x_{dec} = 1$. A restrição (4.5) assegura que um caminho óptico para cada demanda seja criado com nós finais iguais a origem e o destino da demanda. Restrição (4.6) garante que cada caminho óptico é um conjunto de links conectados usando o mesmo slot ao longo da rota, enquanto a restrição (4.7) assegura que a rota não contém nenhum loop. Finalmente, a restrição (4.8) impede que qualquer fatia em qualquer link seja usada por mais de uma demanda, enquanto instala o link quando qualquer fatia é usada.

Dimensionamento de Rede como um Problema de RSA

Minimizar o número de links a serem instalados pode ser diferente do que minimizar o CAPEX, uma vez que outros custos precisam ser considerados. Por essa mesma razão, o problema anterior precisa ser estendido para levar em conta todos os custos e dimensionar todos os recursos da rede. O problema de dimensionamento de rede pode ser formalmente declarado da seguinte forma.

Dado:

- Um grafo conectado $G(N, E)$
- As características do espectro óptico e o conjunto de formatos de modulação
- Uma matriz de tráfego D
- O custo de cada componente, como *cross-connects* ópticos (OXC), transponders e seus tipos e amplificadores especificando sua capacidade e alcance. O custo de instalação de cada link também é especificado

Saída:

- A rota e alocação de espectro para cada demanda em D
- Os links que precisam ser equipados
- Dimensionamento da rede incluindo o tipo de OXC, TPs e regeneradores em cada local

Objetivo:

Minimizar o CAPEX total para transportar a matriz de tráfego fornecida. A solução desse problema poderia ser derivada da formulação NL-SA.

4.2 Técnicas de Resolução

Os modelos para planejamento de rede podem causar problemas com milhares de variáveis. Para lidar com essa complexidade, apresentamos alguns métodos para encontrar soluções quase ótimas.

Otimização em Larga Escala

O objetivo dos métodos de Otimização em Larga Escala (*Large-Scale Optimization - LSO*) é melhorar os algoritmos clássicos Branch & Bound (B & B) [14], onde métodos de decomposição, como geração de colunas (CG) e decomposição de Benders, são usados com sucesso para resolver problemas de projeto de redes de comunicação.

O CG consiste em dois subproblemas que são resolvidos iterativamente, o problema mestre restrito, que é o relaxamento linear (redução do conjunto de possíveis soluções) do problema original que cresce a cada iteração com novas variáveis, e o problema de determinação de preço de novas variáveis para alimentar o mestre restrito. Em cada iteração, o problema de precificação é resolvido tomando como dados de entrada as variáveis do mestre restrito. O algoritmo iterativo termina quando não são encontradas mais variáveis, ou seja, a solução atual do problema mestre restrito não pode ser melhorada. Como o CG não garante soluções ótimas inteiras, o algoritmo B & B precisa ser aplicado.

O método de decomposição de Benders é um procedimento iterativo baseado na fixação de um subconjunto de variáveis e na solução do problema principal, que inclui as variáveis restantes. Para alcançar a solução ideal para o problema original, um subproblema é resolvido para encontrar novas restrições a serem adicionadas ao problema mestre e melhorar a solução geral. Note que, em contraste com a geração de colunas, a decomposição de Benders adiciona desigualdades à formulação linear sendo resolvida, fortalecendo os limites inferiores e acelerando a convergência para soluções ótimas inteiras, ou seja acelera a convergência, porém aumenta a complexidade devido ao aumento da quantidade de restrições.

No entanto, quando o tempo para encontrar uma solução é crítico, o que acontece quando a rede está em operação, um melhor compromisso entre a qualidade das soluções e o tempo de computação pode ser obtido relaxando a condição de otimização para encontrar soluções quase ótimas muito mais rapidamente.

Meta-heurísticas

Algoritmos heurísticos são uma maneira prática de produzir soluções viáveis,. Em particular, as meta-heurísticas guiam um algoritmo heurístico específico do problema a aumentar seu desempenho, evitando as desvantagens da melhoria iterativa, permitindo escapar dos ótimos locais. Embora uma grande variedade de métodos metaheurísticos, nos concentramos em descrever dois deles: o Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (*GRASP*) [16] e o Biased Random-Key Genetic Algorithm (*BRKGA*) [17].

O *GRASP* é um método meta-heurístico iterativo de duas fases baseado em uma técnica de busca aleatória multi-partida. Na primeira fase, um algoritmo é executado para obter aleatoriamente uma solução viável. A solução é construída adicionando iterativamente elementos aleatoriamente escolhidos de uma lista de candidatos restritos, contendo elementos com a melhor qualidade. O tamanho da lista de candidatos restritos é determinada pelo parâmetro $\alpha \in [0, 1]$, sendo os valores α extremos as configurações aleatórias puras e gananciosas puras, respectivamente. Na segunda fase, uma busca local explora em uma vizinhança apropriadamente definida é aplicada na tentativa de melhorar a solução atual. Essas duas fases são repetidas até que um critério de parada (por exemplo, número de iterações) seja atendido e, uma vez concluído o procedimento, a melhor solução encontrada em todas as iterações *GRASP* é retornada. Além disso, a estratégia de intensificação *path relinking* é um método que melhora as soluções *GRASP*.

A meta-heurística *BRKGA* é uma classe de algoritmo genético, foi proposta para resolver problemas de otimização relacionados a RSA [18]. Em comparação com outras meta-heurísticas, a *BRKGA* forneceu soluções melhores em tempos de execução mais curtos. Como nos algoritmos genéticos, cada solução individual é representada por uma matriz de n genes denominados cromossomo, onde cada gene pode tomar qualquer valor no intervalo real $[0, 1]$.

Cada cromossomo codifica uma solução do problema e um valor de adequação, o valor da função objetivo. Um conjunto de indivíduos, chamado de população, evolui ao longo de várias gerações. A cada geração, indivíduos da geração atual são selecionados para acasalar e produzir descendentes, compondo a próxima geração. Na BRKGA, os indivíduos da população são classificados em dois conjuntos: a elite definida com aqueles indivíduos com os melhores valores de aptidão física e não elite. Os indivíduos de elite são copiados inalterados de uma geração para a seguinte, mantendo assim as boas soluções. A maioria dos novos indivíduos é gerada pela combinação de dois elementos, uma elite e outra não-elite, selecionados aleatoriamente (crossover). Uma probabilidade de herança é definida como a probabilidade de que uma descendência herde o gene de seu pai de elite. Finalmente, para escapar do ótimo local, um pequeno número de indivíduos mutantes (gerados aleatoriamente) é introduzido a cada geração para completar uma população. Um algoritmo determinístico, chamado de decodificador, transforma qualquer cromossomo de entrada em uma solução viável do problema de otimização e calcula seu valor de adequação.

4.3 Provisionamento Elástico de Largura de Banda

Nesse modelo, assumimos que os caminhos da luz podem expandir ou contrair dinamicamente o espectro usado para acompanhar as mudanças de tráfego. Considere uma rede óptica flexível onde as mudanças de tráfego são acomodadas em dois níveis diferentes. O primeiro nível é o estabelecimento de novas conexões que podem precisar da implantação de novos equipamentos, e o segundo nível lida com as alterações de taxa através da adaptação dos BVTs, por exemplo, ajustando o formato de modulação e/ou o número de slots espectrais.

As fatias que são liberadas por um caminho de luz podem ser atribuídas a um caminho de luz diferente em instantes de tempo diferentes, obtendo assim ganhos estatísticos de multiplexação. A multiplexação estatística resulta na redução do espectro e do número total de fatias necessárias para atender a um determinado tráfego, ou na forma dupla do problema, na redução do bloqueio das alterações de tráfego para um determinado número de fatias.

O problema da adaptação dinâmica do caminho de luz pode ser formalmente declarado como:

Dado:

- Uma topologia de rede representada por um grafo $G(N, E)$, sendo N o conjunto de nós ópticos e E o conjunto de links de fibra bidirecional conectando dois nós ópticos; cada elo consiste em duas fibras ópticas unidirecionais

- Um conjunto S de fatias de frequência disponíveis da banda espectral para cada elo no conjunto E

- Um conjunto L de caminhos de luz já estabelecidos na rede; cada caminho l é definido pela tupla $\{R_l, f_l, s_l\}$, onde o conjunto ordenado $R_l \subseteq E$ representa sua rota física, f_l sua frequência central e s_l a quantidade de fatias de frequência.
- Um caminho de luz $p \in L$ para o qual o pedido de adaptação do espectro chega e o número necessário de fatias de frequência, $(s_p)^{req}$.

Saída: os novos valores para a alocação do espectro do caminho óptico p fornecido: $\{R_p, (f_p)', (s_p)'\}$.

Objetivo: maximizar a quantidade de taxa de bits.

INPUT: $G(N, E), S, L, p, (s_p)^{req}$

OUTPUT: $(f_p)', (s_p)'$

if $(s_p)^{req} \leq s_p$ then

$(s_p)' \leftarrow (s_p)^{req}$

$(f_p)' \leftarrow f_p$

else

$L^+ \leftarrow \emptyset, L^- \leftarrow \emptyset$

for each $e \in R_p$ do

$L^- \leftarrow L^- \cup \{l \in L: e \in R_l, \text{adjacents}(l, p), f_l < f_p\}$

$L^+ \leftarrow L^+ \cup \{l \in L: e \in R_l, \text{adjacents}(l, p), f_l > f_p\}$

$s_{max} \leftarrow \min\{f_p - f_l - s_l, l \in L^-\} + \min\{f_l - f_p - s_l, l \in L^+\}$

$(s_p)' \leftarrow \min\{s_{max}, (s_p)^{req}\}$

$(f_p)' \leftarrow \text{findSA_MinCFShifting}(p, (s_p)', L^+, L^-)$

return $(f_p)', (s_p)'$

- Algoritmo elástico: a operação elástica requer um caminho de luz p , onde a frequência central desse caminho pode ser alterada e a quantidade necessária de fatias de frequência a serem alocadas, é dada.

Se a redução do espectro elástico for solicitada, a tupla do caminho da luz p é alterada para $\{R_p, f_p, (s_p)^{req}\}$. No caso contrário, quando uma expansão elástica é solicitada, o conjunto de

caminhos adjacentes ao espectro em cada um dos lados do espectro é encontrado, iterando em cada um dos elos da rota de p .

O valor de s_{\max} é limitado apenas pela quantidade de fatias disponíveis entre os caminhos adjacentes do espectro mais próximo. Então, s_{\max} é a soma das fatias mínimas disponíveis ao longo dos links no lado esquerdo e as fatias mínimas disponíveis no lado direito do espectro alocado. Finalmente, o valor retornado $(f_p)'$ é obtido calculando o novo valor da frequência central de modo a minimizar o deslocamento da frequência central. Tanto para expansão e contração do espectro são projetados uma utilização de espectro simétrico, de modo que a frequência central das conexões não mude frequentemente e permaneça próximo da frequência de referência usada quando o congestionamento é baixo.

Capítulo 5 Transmissão em Redes Ópticas Elásticas

Os sistemas ópticos experimentaram um impressionante aumento de capacidade, as taxas de canais aumentaram de 10 G para 40 G até os atuais 100 G, e no ano de 2016, as soluções de 200 G estão entrando no mercado e os primeiros protótipos dos transponders 400 G e 1 T estão em estágio avançado de desenvolvimento. Em termos tecnológicos, isso representou uma transição gradual, passando de sistemas de detecção direta modulada por intensidade (DD) para QAM, empregando detecção coerente e Processamento Digital de Sinais (PDS). A realização de sistemas ópticos comerciais atuais tornou-se possível pela presença simultânea destes três elementos: PDS, formatos avançados de modulação e detecção coerente.

O experimento de M. Taylor [19] destacou a versatilidade do PDS aplicado a sinais coerentemente detectados (onde a informação preservada na fase e amplitude permite a exploração completa de técnicas avançadas de compensação) e a capacidade de compensação total de distorção lineares como como *group velocity dispersion (GVD)* e polarization mode dispersion (PMD) [20]. No entanto, nem todos os tipos de distorções podem ser compensados digitalmente. Em particular, os efeitos não lineares de degradação de fibra ainda representam um grande desafio para aumentar a capacidade do sistema.

5.1 Limitações do sistema

Deficiências do sistema

Um sistema de comunicação óptica consiste em três blocos: o transmissor, um canal de transmissão e o receptor. Com o crescimento da demanda por largura de banda, é previsto que as *EONs* transportarão capacidades superiores a 40 Tb/s (um aumento de quatro vezes em relação ao atual sistema implantado) para satisfazer a previsão atual de tráfego [21]. Para tanto, a indústria está trabalhando para redução dos custos do sistema e em arquiteturas de rede mais eficientes.

Restrições do Transmissor

Os *BVTs* deverão ser capazes de gerar formatos de modulação de alta ordem variando as taxas de símbolos, e os componentes deverão atender aos requisitos de largura de banda. Para tanto a degradação do sinal devida à limitação de largura de banda deve ser minimizada. Essas degradações serão compensadas por uma unidade de PDS colocada dentro do transmissor.

Um dos dispositivos importantes no transmissor é o laser. Suas características, necessárias para *EONs*, são: sintonização em toda a banda C, potência óptica máxima de saída de 16 dBm, largura da linha ≤ 100 kHz e estabilidade de frequência $< 1,5$ GHz. Em seguida, a unidade

PDS deve atender as várias funções, como modelador de pulso digital, pré-compensação digital e pré-distorção não linear do canal

Depois do bloco responsável pelo PDS, os blocos encontrados são o DAC (Digital-to-Analog Converter), o amplificador do driver e o modulador IQ-Mach-Zehnder. O DAC permite a geração de formatos de modulação de alta ordem multinível, seguido pelo amplificador do driver, que define o nível de amplitude para o modulador. Ele introduz várias degradações, como limitação de largura de banda elétrica e comportamento não linear, as quais podem ser atenuadas por pré-distorção digital. Por último, o modulador IQ-Mach-Zehnder, um dispositivo não-linear caracterizado pelos parâmetros: largura de banda e a frequência de entrada. Nenhuma pré-distorção digital no modulador é aplicada, o amplificador do driver estabiliza a entrada para o modulador para que ele funcione no regime linear, produzindo um sinal sem distorções, mas reduz a potência óptica na saída do modulador, assim um amplificador óptico adicional é necessário antes que o sinal entre na fibra.

Os módulos acima apresentam limitações de largura de banda elétrica. Ao considerar dispositivos comerciais, a largura de banda equivalente dessa cadeia de componentes é inferior a 10 GHz, levando a uma forte degradação, uma vez que uma das principais características de um BVT é transmitir taxas de símbolos variáveis para que a taxa de dados possa ser alterada. A limitação de largura de banda implica o uso de técnicas de pré-compensação. Também é importante esclarecer que a transmissão com modulação de alta ordem requer um aumento da potência óptica e conseqüentemente da relação sinal-ruído transmitida.

Restrições do canal

O canal óptico é afetado por dois tipos de degradação. A primeira está relacionada ao meio de transmissão, onde processos e materiais não ideais levam à produção de fibras imperfeitas que degradam a transmissão. A segunda depende dos componentes usados para compensar as deficiências de propagação ou que são utilizados na construção da rede. As primeiras são denominadas deficiências de propagação de fibras, também existem deficiências como emendas de fibras, tensões mecânicas, degradações físicas, conectores, etc., que são típicas para a implantação do sistema.

No princípio as deficiências de propagação foram compensadas através de links personalizados e compensadores ópticos em linha. Com a detecção coerente e PDS, os efeitos lineares são totalmente compensados no domínio digital. No entanto, atenuações e as não linearidades não podem ser compensadas pelo PDS. A atenuação pede a instalação de amplificadores de fibra dopada com érbio (*EDFA*) para manter constante a potência óptica. No entanto, esta solução piora a relação sinal-ruído, ou seja, a qualidade da transmissão, uma vez que

cada amplificador adiciona ruído. No que diz respeito à compensação das não linearidades, foi proposto um grande número de métodos, mas sem uma proposta clara para implementação.

Tais imperfeições (acúmulo de ruído devido a *EDFAs* e efeitos não-lineares) poderiam ser reduzidos pela implantação de novas fibras. Por exemplo, como fibra óptica de perda ultrabaixa. Este tipo de fibra reduz significativamente a quantidade de amplificadores ópticos necessários, aumentando assim a relação sinal-ruído e permitindo a transmissão livre de erros também para formatos de modulação de alta ordem.

Ainda mais degradação é introduzida pela cascata de filtros. As *EONs* serão caracterizadas por novos *ROADMs* baseados em *WSS* com menor granularidade e a grande vantagem de otimizar a alocação de largura de banda dentro da rede, como consequência, a banda de guarda que está em sistemas com grade fixa de 50 GHz que são relativamente grandes, pode ser bem reduzida. Finalmente, o *WSS* atual está longe de ser ideal e isso limita consideravelmente o número de filtros pelos quais um canal pode passar. Quando os canais ópticos passam por uma cascata de filtros ópticos estreitos com tais configurações, eles sofrerão degradações que podem se tornar dominantes em relação às deficiências de propagação de fibras mencionadas anteriormente.

Restrições do Receptor

Além do *ADC*, necessário para converter o sinal de analógico para digital, a parte restante é dedicada à unidade de *PDS*, maior e mais complexa que a do transmissor. O *PDS* compensa deficiências do sistema por meio de algoritmos matemáticos.

O fotoreceptor, em particular, o amplificador de transimpedância incorporado, precisa de largura de banda suficiente para evitar distorções no caso de altas taxas de símbolos recebidas. O *ADC* possui variáveis com mesmas características do *DAC* (Número de bits, largura de banda elétrica e taxa de amostragem adequada), que se torna relevante se aumentarmos a taxa de símbolos e/ou a ordem do formato de modulação.

5.2 Processamento Digital de Sinais para EONs

Em *EONs*, os *PDS* atuam nos *BVTs*, para compensar as deficiências de transmissão e reduzir a penalidade de componentes de hardware não ideais para que formatos avançados de modulação possam ser gerados.

Arquiteturas de Processamento Digital de Sinais

Os passos comuns, para uma arquitetura de processamento de sinal típica de um receptor são:

- Reamostragem e correção das imperfeições
- Correção de falhas de canal estático (compensação *GVD*)
- Equalização de deficiências de canais (rotações de polarização, *PMD*, recuperação de temporização, filtragem combinada)
- Compensação do *offset* de frequência entre oscilador local e sinal de laser, recuperação de fase de portadora e finalmente
- Estimação de símbolo, decodificação e *Forward Error Connection (FEC)* [21]

No *S-BVT*, os algoritmos PDS devem ser transparentes no formato de modulação, permitindo assim a escolha flexível de diferentes taxas de bits e eficiências espectrais.

Arquiteturas PDS cegas

Os receptores com PDS cego utilizam a equalização no domínio do tempo e apresentam apenas duas funcionalidades PDS que requerem informações sobre o formato de modulação recebido: a equalização dinâmica de canal e a estimativa da fase da portadora. Os blocos básicos de construção de um receptor PDS cego estão representados na Fig. 5.1a. Como o critério de atualização do equalizador dinâmico depende do formato de modulação [21], essa abordagem é menos atraente para o formato de modulação *BVTs* transparentes.

Arquiteturas PDS Assistidas por Dados

A razão por trás do interesse por abordagens de equalização auxiliadas por dados está relacionada à possibilidade de inserção periódica de símbolos piloto ou de treinamento [22]. As sequências de treinamento inseridas, que podem ser iguais para todo tipo de formato de modulação de carga útil, requerem uma pequena quantidade de sobrecarga (normalmente $\leq 3\%$) e permitem a equalização transparente do canal. Os blocos PDS para receptores coerentes baseados em dados são similares aos cegos e são relatados na Figura 5.1b. Diferentes tipos de sequências de treinamento, já investigadas em sistemas de comunicação sem fio, comparações entre diferentes sequências de treinamento e suas diferenças de desempenho para sistemas ópticos foram estudadas em [22], e ainda é um tópico de pesquisa aberta.

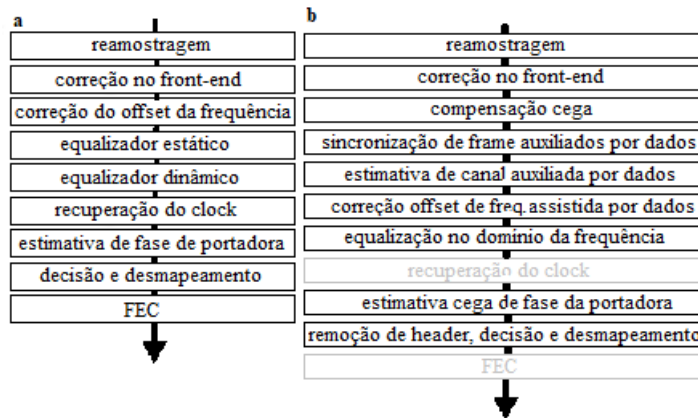


Fig. 5.1 (a) Estrutura de PDS do receptor, (b) Estrutura de uma implementação exemplificando o PDS auxiliada por dados. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

5.3 Processamento Digital de Sinais no Transmissor

Será comparado o desempenho dos sistemas com componentes comerciais e componentes ideais e logo após será introduzida algumas técnicas de PDS para pré-distorcer digitalmente as limitações dos componentes.

Impacto da Qualidade dos Componentes no Desempenho do Sistema

Para avaliar a degradação no nível do sistema, foi avaliado em [21] o desempenho de um conjunto de formatos de modulação quando valores realísticos de alguns dispositivos são considerados. Por exemplo, os DACs são limitados pela largura de banda de aproximadamente 18 GHz e a resolução de amplitude é cerca de 6 *Effective Number of Bits (ENOB)*. Essas características, se não forem compensadas, reduzirão significativamente a distância máxima alcançada pela transmissão. No geral, a degradação cresce em função da ordem do formato de modulação e da taxa de símbolos.

Em [23], foram testados links de longa distância com os formatos de modulação bastante usados, como, *QPSK*, *8-QAM* e *16-QAM*. A seguir, o desempenho de transmissão foi avaliado em três cenários: caso ideal (ou seja, apenas efeitos de propagação de fibra são considerados), disponível atualmente (limitações de componentes baseadas na literatura) e entre 3 e 4 anos (limitações de componentes baseadas em estimativas). A pré-compensação digital e nem um modelo de atenuação foram consideradas.

Os resultados numéricos foram confirmados por comparação com o modelo de ruído gaussiano. Foi propagado um espectro contínuo *DWDM* com espaçamento de canal = $1,15 \times R_s$ (onde R_s é a taxa de símbolo) e com o pulso de Nyquist. A mesma largura de banda *DWDM* de 1,23 THz foi simulada para todos os casos, assim o número de supercanais variou de acordo com

os diferentes formatos de modulação. Os resultados são apresentados na Fig. 5.2a para os três cenários com uma configuração *DWDM 16-QAM* de 40x200 Gb/s. A limitação de largura de banda dos transmissores individuais, no caso de componentes realistas, é visível.

A figura 5.2b mostra a distância máxima de transmissão \times potência. A curva preta é obtida usando a aproximação com o modelo de ruído gaussiano. A partir desses resultados, aqueles com valores estimados dos componentes dentro de 3 a 4 anos atingem melhor desempenho, mostrando que esses valores são necessários para esses componentes.

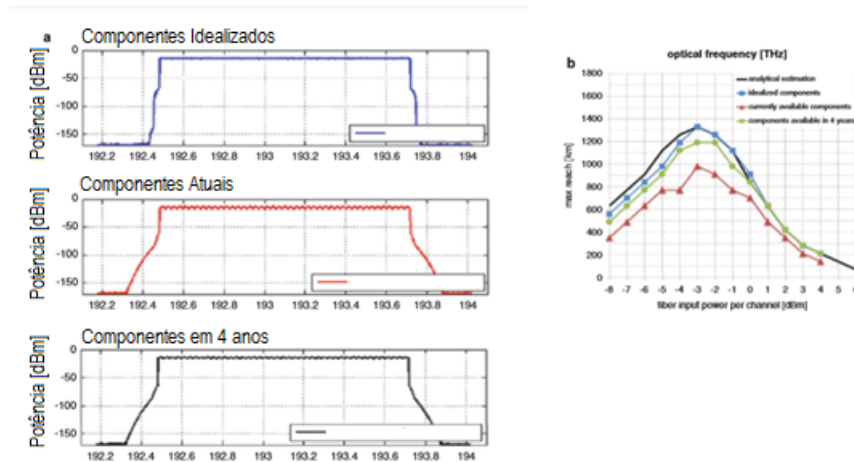


Fig. 5.2 (a) Espectro PM-16-QAM de 40×200 Gb/s para os diferentes cenários (b) alcance versus potência para os diferentes cenários. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

Técnicas avançadas de pré-compensação digital

As *EONs* preveem transmissão com taxa de dados ≥ 400 Gb/s e nas taxas de símbolo ≥ 40 GBd. Sabemos que *DACs* de última geração apresentam largura de banda elétrica < 18 GHz, valores que não permitem a geração de 40 GBd sem uma penalidade significativa. Além dos componentes que introduzem distorções significativas como, o amplificador do driver-RF e o modulador de IQ. Portanto, devemos aplicar compensação no transmissor para atenuar as limitações de largura de banda elétrica. Em [24], é atingido o melhor desempenho de alcance pela pré-ênfase digital conjunta do *DAC* e do o amplificador do driver-RF.

5.4 Processamento de sinal digital no receptor

As *EONs* são muito afetadas por efeitos não lineares (ruídos), devido à alta densidade de canais compactados, operando em formatos de modulação e taxas de dados variáveis. O aumento da capacidade do sistema através de *EONs* é alcançado à custa da redução do alcance da transmissão e das margens do sistema [25].

Os problemas relacionados às deficiências não-lineares das fibras são as distorções (ruídos) induzidas pelo tráfego e pela interação entre sinal e potência de ruído. Ambos podem ser representados como processos estocásticos, tornando sua atenuação bastante complexa. No geral, devido às condições acima mencionadas, apenas uma atenuação parcial é possível empregando compensação não-linear óptica ou elétrica [26]. A compensação digital não-linear de banda larga demonstrou desempenho significativo, apesar de ter um custo de complexidade alto e serem caras economicamente.

Inversão Espectral

A inversão espectral (IE) surge com bastante frequência no contexto do processamento de sinais para sistemas de comunicação. Em suma, inversão espectral é a inversão da orientação da largura de banda do sinal em relação à frequência da portadora. Idealmente, a inversão espectral precisa ser colocada no centro do elo de transmissão e requer um perfil de sinal simétrico nas duas metades do enlace. O conceito de inversão espectral combina com as EONs, nas quais o SI pode ser empregado para o supercanal, efetivamente anulando quaisquer deficiências de fibras lineares e não-lineares.

Assumindo várias configurações de transmissão de supercanais, o conceito central de IE é ilustrado na Fig. 5.3. A figura mostra compensação da não-linearidade do supercanal, no centro do enlace, considerando um ROADM, onde os canais transmitidos WDM são desmultiplexados. A IE pode ser aplicada ao supercanal antes de multiplexar os sinais. Esse processo atenua todas as deficiências de fibras lineares e não-lineares de supercanais, minimizando essencialmente o impacto da alocação dinâmica de tráfego, limitada pelas não-linearidades do canal [27].

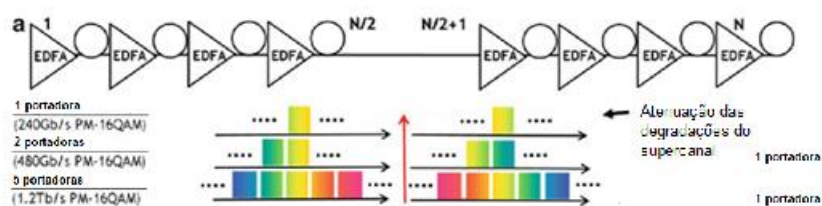


Fig. 5.3 Conceito de inversão espectral de supercanal BVT. Adaptado de Elastic Optical Networks [2]

Digital Back-Propagation

O DBP tem sido um dos métodos de atenuação não linear mais investigados, sendo capaz de compensar efeitos lineares e não lineares. A ideia por trás do DBP é inverter o canal óptico dentro do receptor. As análises realizadas nos últimos anos destacaram que, o DBP pode ampliar o alcance em 10 a 25%, dependendo do cenário considerado e aumentar a potência de

transmissão em 1 a 2 dBm no caso de transmissão WDM. Por outro lado, apresenta a desvantagem de ser bastante complexa, porque requer a implementação de múltiplas FFTs, e é limitada à largura de banda [28].

Rádio-Frequência - Tom Piloto

A compensação de ruído de fase assistida por tom piloto foi proposta para compensar o ruído de fase intra-simbólico do laser em sistemas *OFDM* [54]. A ideia é transmitir um Tom piloto não modulado, em uma determinada posição, dependendo dos sinais transmitidos. Na transmissão OFDM, o tom piloto seria colocado entre duas subportadoras, enquanto que para a transmissão de uma única portadora poderia ser colocado fora da banda, como proposto em [29]. Em ambos os casos, reduz a eficiência espectral.

O tom piloto é filtrado no receptor e usado para estimar o ruído de fase que o sinal sofreu ao longo do link. Este método pode na teoria compensar qualquer forma de ruído de fase, uma vez que o ruído residual é tratado de forma idêntica à não-linearidade da fibra. Por outro lado, apresenta limitações, pois requer uma faixa de proteção para que o tom piloto possa ser filtrado e apenas distorções de fase dentro da faixa de banda do filtro possam ser compensadas [29].

Capítulo 6 Arquiteturas de Nó para Redes Ópticas Elásticas

Uma rede óptica baseia-se na configuração e desmontagem de caminhos ópticos que conectam nós de entrada e saída em sistemas de transporte óptico *WDM*, para tanto, um nó óptico precisa tratar de maneira eficiente e apropriada os canais ópticos.

À medida que a demanda de tráfego aumenta e novos serviços surgem, novos elementos de rede são necessários para maior flexibilidade nas redes ópticas. Considerando esse requisito, são necessárias arquiteturas de nós ópticos para suportar e tratar a elasticidade e a flexibilidade em redes ópticas. Uma arquitetura de nó é ilustrada abaixo na Fig. 6.1.

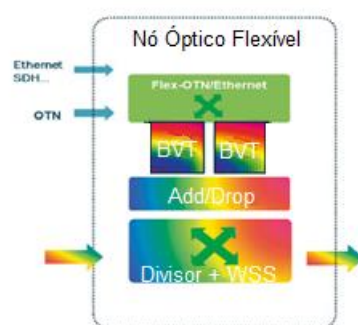


Fig. 6.1 Arquitetura de nó flexível multi-camada de alto nível. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

6.1 Requisitos para nós ópticos flexíveis

Revisão da Arquitetura Tradicional

Na primeira geração de sistemas de transporte óptico existiam apenas configurações de transmissão de comprimento de onda único, onde todas as funções de comutação e camada de rede superior foram realizadas no domínio eletrônico. A segunda geração de sistemas ópticos permitiu a transmissão de múltiplos comprimentos de onda através da tecnologia *WDM* (aumento de capacidade e conectividade ponto-a-ponto), onde todo o tráfego passa por uma malha de comutação eletrônica, e as únicas funções executadas na camada óptica eram multiplexação/demultiplexação de comprimento de onda. A terceira geração trouxe a tecnologia *WDM* que implementa filtros permitindo o *by-pass* óptico e o *add/drop* de comprimentos de onda, conhecidos como *OADMs*. A tecnologia *ROADM* representa a quarta geração de sistemas ópticos, onde comprimentos de onda ópticos podem ser comutados dinamicamente dentro de uma rede óptica. Agora, os canais ópticos podem ser adicionados e removidos de forma flexível por meio de funções de comutação de comprimento de onda integradas nos nós, a fim de atender às demandas de largura de banda em constante mudança.

A transmissão *WDM* futuramente evoluirá para as redes elásticas, aproveitando o equilíbrio entre eficiência espectral e alcance da transmissão. Nessas redes, os supercanais requerem bandas de proteção menores por aplicar formatos de modulação eficientes em relação ao espectro, de modo que os recursos espectrais são liberados para o transporte de canais de alta capacidade por longas distâncias. Essa conectividade de supercanais é chamada de comutação flexível de espectro, e os nós ópticos flexíveis devem lidar com essa atribuição de espectro variável além da comutação.

Uma arquitetura de nó óptico flexível compreende uma parte tradicional de um nó “não flexível” e uma parte de *add/drop* (Figura 6.1) implementando a atual geração de *ROADMs*. A parte tradicional é baseada em uma arquitetura *Broadcast-and-Select* que compreende um divisor e um único *WSS* por grau *ROADM*. O divisor é usado para fornecer uma cópia do espectro óptico a todas as saídas, enquanto o *WSS* seleciona quais partes do espectro (supercanais) são designadas para determinada saída, e bloqueia opticamente o resto [30]. Embora as funções centrais de comutação sejam incolores, a parte de *add/drop* compreende um componente “colorido” (um comprimento de onda específico) para distribuir os comprimentos de onda nos pontos de *drop* correspondentes ou para adicionar ondas ao tráfego localmente.

Dispositivos dos nós

Desenvolver *ROADMs* de largura de banda flexível é desenvolver uma nova geração de dispositivos que suportem larguras de banda variáveis e alocação de espectro de grade flexível: *WSSs*, switches *multicast* e transponders junto com amplificadores e monitores ópticos específicos da aplicação.

Wavelength Selective Switch

Os *WSSs* da primeira geração alocam um único elemento de comutação (espelho/pixel) para cada canal, o que significa que a largura de banda do canal e a frequência central são fixos e não pode ser alterado sob demanda. Isso impede a concatenação de canais espectralmente adjacentes para criar um supercanal que pode ser comutado como uma única entidade. A fim de explorar o potencial das *Elastic Optical Networks*, a largura de banda do supercanal e a frequência central devem ser dinamicamente configuradas. Os *WSSs* de segunda geração, baseados em matrizes de cristal líquido em silício (*LCoS*) permitem o controle dinâmico da frequência central do canal e da largura de banda através da configuração de painéis internos de pixels. Esses parâmetros podem ser controlados dinamicamente.

Bandwidth Variable Transponders

Um componente de imensa importância é o transponder que fica na extremidade de *add/drop* do nó óptico. A fim de aproveitar a eficiência espectral e viabilizar o *trade-off* para aumentar a elasticidade nas redes, os transponders precisam suportar vários formatos de modulação. Para dar um exemplo, os sistemas de transmissão baseados na tecnologia atualmente coerentes têm sido propostos com formatos de modulação que vão desde os formatos DP-BPSK, DP-QPSK e DP-16QAM até a OFDM. Os formatos anteriores podem ser gerados e recebidos usando os mesmos designs de hardware de transmissor e receptor coerente. Um transponder flexível requer um laser altamente preciso que pode ser sintonizado pela grade flexível, no lado do transmissor, e um receptor coerente. A fim de suportar a variação dos formatos de modulação, também requer um pré e pós-processador com conversores digital para analógico, de modo a criar o sinal elétrico para o modulador e receber o sinal no receptor.

Multicasting Switch

Um *multicast switch* resolve a contenção no nível de comprimento de onda no ponto onde ocorre o *drop* de um sinal e pode ser composto por um conjunto de divisores combinados com comutadores ópticos. Assumindo que precisamos de M graus para alcançar as N portas receptoras, o tráfego de cada fibra é transmitido através de um divisor de $1 \times N$ para uma porta de um comutador $M \times 1$, que permite apenas os canais originários de uma porta/grau específica alcancem o receptor coerente.

6.2 Regras de Design

As características que um nó deve apresentar para ser apropriado para uma arquitetura de nó flexível são:

Flexibilidade

A principal propriedade de um *ROADM* flexível é alternar de forma dinâmica os supercanais de largura de banda variável entre as portas de entrada e saída. Isso se traduz no controle da frequência central e da largura de banda espectral de cada porta de um nó óptico flexível. Com relação à arquitetura tradicional de um *ROADM*, isso significa que tanto o WSS, que é o elemento colorido principal do *ROADM*, quanto os transponders devem ser capazes de operar de maneira flexível. Atualmente, uma resolução de 6,25 GHz para a posição do canal e 12,5 GHz para a largura de banda foi proposta.

Um nó óptico dentro de uma rede é considerado flexível se for capaz de lidar com mudanças, adaptando-se dinamicamente às modificações na rede causadas por variações nas demandas de tráfego e requisitos de rede e vários tipos de flexibilidade em um nó são reconhecidos, tais como:

- Flexibilidade de canal: o nó suporta várias taxas de bits e formatos de modulação
- Flexibilidade de Expansão: o nó é facilmente escalonado para suportar maior tráfego
- Flexibilidade funcional: o nó é capaz de fornecer muitas funções diferentes, incluindo desfragmentação do espectro, conversão de formato, regeneração.
- Flexibilidade de comutação: o nó é capaz mapear entradas para saídas de diferentes maneiras e através de várias dimensões
- Flexibilidade de roteamento: o nó é capaz de transportar sinais de entrada para saída ao longo de diferentes rotas
- Flexibilidade de Arquitetura: o nó é capaz de rearranjar seus blocos de construção para construir diferentes arquiteturas.

Reconfiguração

O tempo de reconfiguração de um nó óptico, no entanto, é atualmente imposto pelos serviços de rede óptica e limitado pela tecnologia. Para redes ópticas flexíveis, o tempo de reconfiguração é ditado pelo tempo de reconfiguração do nó óptico e dos transponders. Para oferecer capacidade de atualização sem interrupção do serviço, o tempo de reconfiguração de milissegundos deve estar disponível para essas tecnologias.

Incolor, sem direção e sem contenção

Para permitir a flexibilidade e a reconfiguração dos nós ópticos flexíveis, foram sugeridas arquiteturas flexíveis sem cor, sem direção e sem contenção (*CDC*)

- Arquiteturas incolores compreendem arquiteturas que permitem que qualquer comprimento de onda ou (super) canal seja adicionado/removido (*add/drop*) localmente, permitindo a conectividade de qualquer canal de comprimento de onda a um ponto de *add/drop*,
- As arquiteturas sem direção permitem que sinais sejam roteados para qualquer direção pelo nó. A contenção pode ocorrer quando duas cores solicitam a mesma saída/direção.
- Arquiteturas sem contenção garantem que nenhum bloqueio de comprimento de onda possa ocorrer no caso em que duas mesmas cores, vindas de diferentes fibras, solicitem a mesma fibra de saída. Esse cenário que pode ocorrer em *ROADMs* incolores e sem direção, conforme o tráfego *add/drop* for redirecionado.

- Os *ROADMs* incolores, sem direção e sem contenção oferecem as mesmas vantagens que um *ROADM* incolor e sem direção, e também se baseiam em portas sem cor para permitir que vários supercanais da mesma cor sejam adicionados ou removidos.

Escalabilidade/Modularidade

As arquiteturas de nós ópticos flexíveis devem ser escalonáveis, isso significa que a arquitetura de nós ópticos flexíveis deve ter a capacidade de suportar o crescimento em relação à capacidade por fibra e o número de portas/graus que está relacionado tanto ao número de fibras quanto ao número de nós que podem ser conectados uma arquitetura específica.

Confiabilidade

A resiliência de um nó óptico depende da capacidade de retornar à operação original após uma falha ou uma falha deve ser incorporada na arquitetura do nó para que a reconfiguração do nó e, portanto, a rede possa ser executada normalmente em menos de 50 ms.

Crítérios de Desempenho

Capacidade/Taxa de transmissão

A capacidade de um nó refere-se quantidade de tráfego máxima que pode ser comutada em uma arquitetura de nó específica. Ela é ditada pelo grau *ROADM* e pela eficiência espectral do sistema de transmissão de rede óptica *flexgrid*. Portanto, considerando uma arquitetura incolor, sem direção e sem contenção, a capacidade dos nós é proporcional ao número de portas de entrada/saída e à quantidade máxima de tráfego que pode ser transmitida através do *ROADM*.

Granularidade de comutação

Sistemas de transmissão óptica de grade flexível têm sido propostos para maior eficiência espectral e elasticidade na camada óptica. No entanto, para aproveitar ao máximo essa nova possibilidade, o acesso total e a manipulação dessa granularidade mais fina, a possibilidade de utilizar um slot espectral deve estar disponível não apenas na extremidade do receptor ou do transmissor, mas nos nós de comutação intermediários. O principal obstáculo até agora para este empacotamento espectral foi o filtro necessário para comutar canais *WDM* adjacentes, o que foi aliviado com o uso de comutação baseada em matriz (LCoS, etc.).

Os subcanais que compreendem um supercanal não precisam necessariamente ser contíguos no comprimento de onda, mas precisam ser comutados como uma entidade pelo nó óptico flexível. A menor entidade de comutação que os nós ópticos podem transmitir é o slot espectral do sistema de transmissão óptica, portanto, a frequência central de um canal deve ser definida com uma resolução de 6,25 GHz e a largura do canal com uma resolução de 12,5 GHz.

Performance física

Uma das principais limitações ao alcance de um determinado sinal é a degradação de sua relação *Optical Signal Noise Ratio (OSNR)* à medida que ele se propaga através do sistema de transporte. Portanto, as *Optical Transport Networks (OTN)* que reduzem a taxa dessa degradação poderiam transportar mais sinais, ao mesmo tempo em que mantêm uma *OSNR* semelhante, permitindo a transmissão de formatos de eficiência espectral superior. Embora isso ainda seja um problema para o sistema de transmissão, os requisitos de *OSNR* tornam-se rigorosos quando o sinal passa por vários nós ópticos, o que será o caso quando transmitido para a rede óptica *flexgrid*. Portanto, um bom desempenho de concatenação se traduz em requisitos de *OSNR* melhores, o que significa menos interferência no nó. No nó, *OSNR* satisfatórios se traduzem em *WSS* de baixa interferência. Os valores típicos de isolamento em um *WSS* de 9 portas estão na faixa de 35 a 45 dB, o que significa que a interferência ainda se acumula à medida que o canal passa por nós sucessivos. Assumindo uma detecção coerente, esta interferência, juntamente com o ruído óptico gerado pela amplificação óptica, é uma fonte primária de degradação de sinal que limita o alcance do sistema de transmissão.

6.3 Add/Drop

A Figura 6.2 mostra que uma arquitetura genérica de um OXC, ele consiste no comutador expresso e nas partes de add/drop. A motivação para a introdução de OXCs foi eliminar as dispendiosas conversões Óptica/Elétrica e Elétrica/Óptica dos percursos ópticos dos nós, o OXC também ajuda a eliminar a intervenção humana, automatizando o provisionamento de novos caminhos ópticos e a proteção/restauração de camadas ópticas. A automação engloba o provisionamento de futuros serviços ópticos dinâmicos, e isso se tornará mais claro com a evolução das tecnologias SDN (Software Defined Networking). Para conseguir a flexibilidade necessária, as partes add/drop dos OXCs devem oferecer funções sem cor/sem direção/sem contenção (C/D/C).

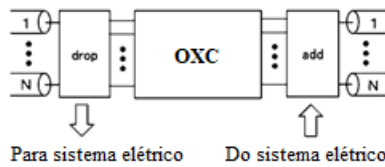


Fig. 6.2 Arquitetura OXC genérica. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

Existem diferentes maneiras de implementar a parte de comutação expressa e de add/drop, as mais usais são abseadas nos WSS, pois eles podem processar mais facilmente vários comprimentos de onda, uma vez que a maioria dos componentes ópticos pode ser compartilhada entre diferentes comprimentos de onda.

6.4 Arquiteturas de Nó e Interface com as redes

Uma utilização eficiente da largura de banda da rede visando o custo mínimo por bit transportado exige o agrupamento de serviços de baixa taxa de dados, como fluxos de roteadores IP de borda (IPTV, VoIP etc.) com sinais dos canais DWDM de taxa elevada. O agrupamento elétrico ainda é a única solução prática e confiável para otimizar o uso da largura de banda em redes ópticas, e o *Optical Transport Hierarchy (OTH)* é o método de agrupamento ou multiplexação no domínio elétrico. Ele se baseia em uma unidade de transporte de canal óptico (*OTU*) que é usada para adaptar as informações dos serviços à camada óptica (Fig. 6.3).

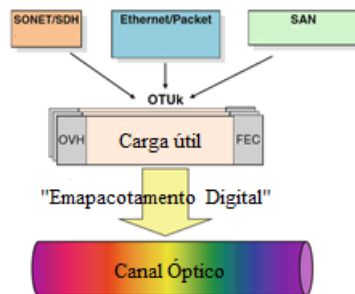


Fig 6.3 Comutação e transporte independentes de protocolo. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

OTH é uma parte integrante das *OTNs*, a tecnologia de transporte para as redes ópticas desenvolvidas pelo *ITU-T*, compreendendo todas as funcionalidades necessárias para suportar o transporte, agregação, roteamento e supervisão dos sinais do cliente que são processados nos domínios ópticos e digitais. A arquitetura de rede *OTN* é definida na *ITU-T G.872, "Architecture for the Optical Transport Network (OTN)"* [31] onde a rede é decomposta em camadas de transporte independentes particionadas de forma a refletir sua estrutura interna (Fig. 6.4).

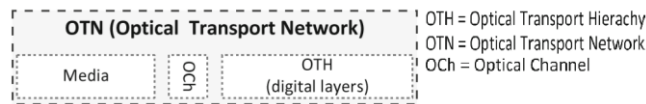


Fig. 6.4 Visão geral do OTN. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

O ITU-T desenvolveu a estrutura padrão OTN, com o objetivo geral de proporcionar recursos como monitoramento de desempenho, detecção de falhas, canais de comunicação, os para redes WDM. Os benefícios mais importantes que o padrão OTN trouxe para a rede óptica, são:

- Contêineres universais que suportam qualquer tipo de serviço para um transporte transparente óptico de ponta a ponta do tráfego do cliente.
- Uma hierarquia de multiplexação padrão que acomoda sinais de clientes de várias naturezas em uma interface de linha servida por um único canal óptico.
- Uma estrutura que suporta recursos de FEC fortes para aplicativos ópticos de longa distância.
- Esquemas de proteção sub-50 ms

Um multiplexador OTN é ilustrado na Fig. 6.5

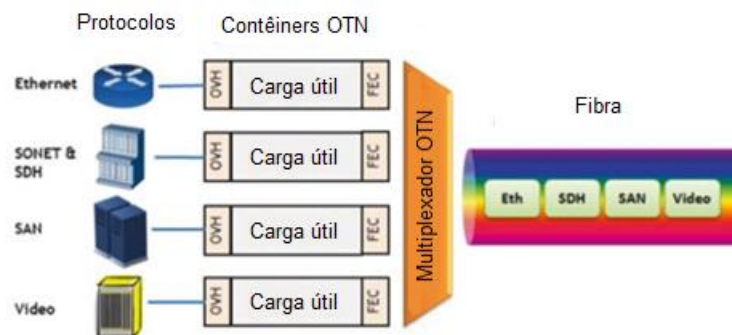


Fig. 6.5 Multiplexação OTN. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

A nova geração de transponders ópticos para a EON requer uma abordagem mais flexível. O número de portadoras, o formato de modulação e a taxa de transmissão estão se tornando parâmetros de configuração que permitirão que os operadores de rede tenham o equilíbrio entre a capacidade digital ou taxa de linha e alcance o melhor para sua infraestrutura de transporte.

Assim, espera-se que o futuro da hierarquia OTN “além de 100G” (B100G OTN) introduza um formato de interface de linha flexível. O pensamento predominante atual no debate da evolução do OTN é favorável à definição de uma estrutura iterativa “ $n \times 100 \text{ Gb / s}$ ” (com $n \geq$

2), denominada OTUC_n mostrada na Fig. 6.6. O índice “n” sugere imediatamente a possibilidade de taxas de bits variáveis na etapa de 100 Gb/s; enquanto as interfaces elásticas OTUC_n podem ter qualquer $n \geq 2$ e ser redimensionáveis. Esse novo protocolo de linha flexível rompe a simples associação 1: 1 entre comprimento de onda e OTU/ODU no sentido de que um OTUC_n/ODUC_n pode ser distribuído através de vários portadores ópticos que ocupam um ou múltiplos slots de frequência. Sinais muito grandes (400 Gb/s ou acima) são divididos em vários mais finos que podem ser transportados em múltiplos comprimentos de onda (seu número e formato de modulação serão o melhor compromisso entre eficiência espectral e alcance), possivelmente se encaixando em um único canal de mídia para minimizar a ocupação do espectro (os comprimentos de onda adjacentes podem ser embalados com pouca ou nenhuma faixa de proteção reduzida) ou, alternativamente, em múltiplos canais de mídia não adjacentes para lidar com a possível fragmentação espectral nas redes existentes.

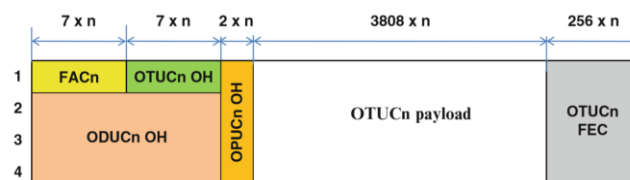


Fig. 6.6 Exemplo de unidade de transporte óptico flexível para a evolução da OTN “além” de 100G. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

Capítulo 7 Sliceable Bandwidth Variable Transponders

As *Elastic Optical Networks* demandam o uso de novos dispositivos para maior flexibilidade na atribuição de recursos como capacidade ou espectro, alcançando otimização da rede. Houve várias demonstrações de transmissores variáveis de taxa de bits em que o número de subportadoras ou o formato de modulação são adaptados para atingir a taxa de bits desejada e maior eficiência espectral. Porém, quando um *BVT* é operado a uma taxa inferior à sua taxa máxima, devido ao alcance requerido ou às deficiências no caminho óptico, parte da capacidade do *BVT* é desperdiçada. A fim de evitar esse desperdício, o *S-BVT* foi proposto [32]. Um *S-BVT* é capaz de alocar sua capacidade em um ou vários fluxos ópticos que são transmitidos para um ou vários destinos, conforme ilustrado na Fig. 7.1b. Assim, quando um *S-BVT* é usado para gerar um canal de baixa taxa de bits, sua capacidade restante também pode ser explorada para transmitir outros fluxos de dados independentes. Do ponto de vista das camadas superiores, um *S-BVT* pode ser visto como um *BVT* de alta capacidade ou como uma coleção de múltiplos *BVTs* de baixa capacidade, logicamente independentes, dependendo do modo de operação.

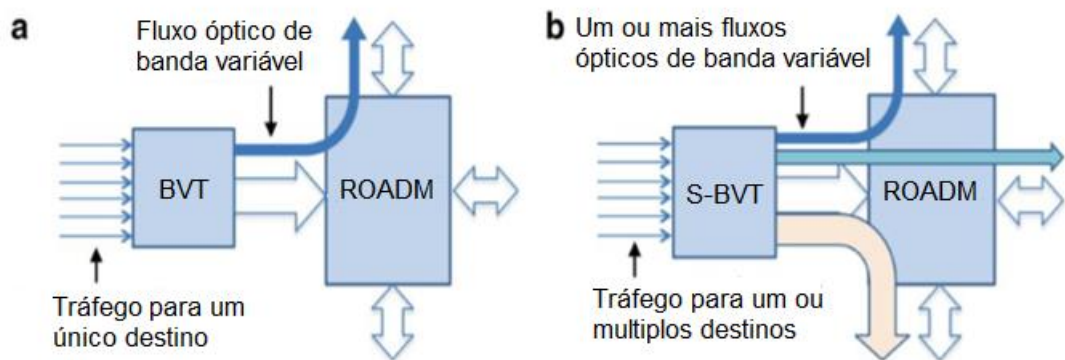


Fig. 7.1 Esquemas do (a) BVT e (b) S-BVT. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

7.1 Arquiteturas de S-BVTs

Requisitos do S-BVT

Os *S-BVT* devem satisfazer os seguintes requisitos:

- Capacidade de fatiar: o transponder deve ser capaz de gerar subportadoras, de modo que elas possam formar um supercanal ou ser separadas e direcionadas para diferentes portas de saída.
- Capacidade de gerar subportadoras com espaçamento de canal configurável: o transponder deve gerar subportadoras com espaçamento de canal variável, dependendo da sua taxa de bit e formato de modulação. Essa propriedade também pode ser um requisito para capacidade de fatiar. Por exemplo, em um supercanal as subportadoras são espaçadas por 28 GHz. Tal espaçamento é

permitido somente quando essas subportadoras são consideradas um supercanal, que como uma única entidade, ocupa uma largura de banda total de 200 GHz (28 GHz vezes sete subportadoras). Quando as subportadoras são separadas, o espaçamento das subportadoras pode se tornar 37,5 GHz, que é o menor espaçamento de malha flexível da ITU-T [33] e maior que os 28 GHz.

(c) Suporte a múltiplas taxas de bits: o transponder deve suportar diferentes valores de taxa de bits, variando o número de subportadoras ou alterando a taxa de bits de cada uma delas.

(d) Adaptação de alcance: um *trade-off* entre alcance óptico e eficiência espectral pode ser encontrado através do suporte de múltiplos formatos de modulação. Por exemplo, cada subportadora pode ser transmitida com PM-16QAM ou PM-QPSK, dependendo da distância da transmissão.

Arquitetura S-BVT

A arquitetura de um S-BVT é apresentada na Fig. 7.2. As demandas de tráfego são associadas às unidades de transporte da *Optical Transport Network (OTN)* especificamente, na unidade de transporte óptico (*OTUCn*) através de um *OTN framer module* flexível, capaz de particionar dinamicamente a sua taxa de transferência total em interfaces virtuais *OTUCn*. O mesmo módulo também é capaz de fragmentar cada *OTUCn* entre vários Grupos Tributários (*OTUCnTG*), para permitir a distribuição de carga em diferentes canais de mídia. Os *OTUCnTGs* alimentam os de módulos ópticos multifluxo.

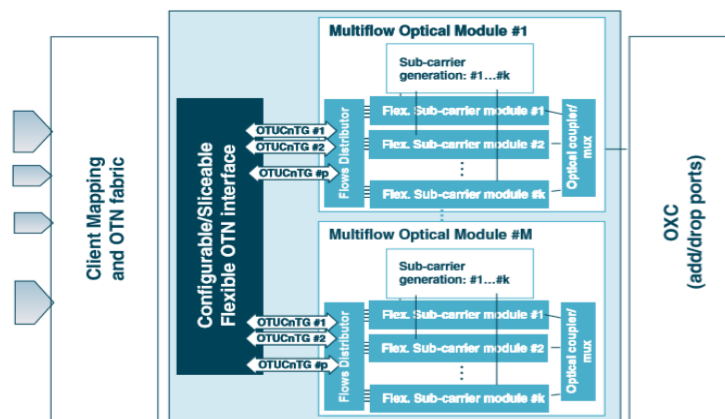


Fig. 7.2 Arquitetura S-BVT. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

Os p fluxos independentes são usados para modular as subportadoras ópticas, no *Multi-flow Optical module*, que é composto de um módulo distribuidor de fluxo, um módulo gerador de subportadoras, o qual gera k ($k \geq p$) subportadoras não moduladas para k *Flex Sub-carrier module* (cada subportadora é modulada por uma porção de tráfego específica), e um módulo multiplexador.

De início, o Distribuidor de fluxo (por exemplo, uma matriz de comutação eletrônica) direciona um determinado número de faixas do agregado de fluxos para um *Flex Sub-carrier module* específico. O Distribuidor de fluxo permite que o tráfego module uma única subportadora para transmissão na camada óptica. O módulo flexível de subportadora é responsável pela eletrônica de processamento digital, como conversor digital para analógico, conversor analógico para digital, processamento digital de sinais. A taxa de bits e a largura de banda podem ser ajustadas alterando o formato de modulação, a taxa de transmissão, a modelagem espectral e a codificação. Todas as subportadoras geradas são agrupadas em supercanais distribuídos em diferentes canais de mídia e acoplados opticamente em uma única porta de entrada/saída do nó *Optical Cross-Connect (OXC)* de origem. Então, com a configuração de nó adequada, os canais de mídia são roteados de forma independente e transparente através da rede até nós de destino específicos.

Flex Sub-carrier module

O módulo flexível de subportadora pode ser implementado com foco em técnicas de transmissão específicas, o que permite que o S-BVT seja adequado para diferentes cenários, apresentando diferentes níveis de eficiência espectral (medido com b/s/Hz) e complexidade. Um S-BVT, em particular o módulo flexível de subportadora, pode ser baseado em técnicas de transmissão *WDM*, *OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing)*. A Tabela 7.1 resume as características das técnicas de transmissão implementada no módulo flexível subportadora.

Tabela 7.1 Características principais do S-BVT, dependendo do tipo de técnicas de transmissão implementadas no Flex Sub-carrier module

Técnica de transmissão do módulo Flex Subportadora	Eficiência espectral máxima	Alcance óptico	Custo e complexidade do módulo Flex Subportador	Casos de uso
Nyquist WDM	Depende do formato de modulação, o espaçamento de canal é pelo menos igual à taxa de símbolo: por ex. 4 b/s/Hz com PM-QPSK e 8 b/s/Hz com PM-16QAM	Dependente do formato de modulação (vários milhares de km para PM-QPSK e PM-16QAM, menos para formatos superiores)	Principalmente por DAC, ADC, DSP (por exemplo, largura de banda eletrônica $\approx 0,5 \times$ taxa de transmissão)	Transmissão de longo curso com alta eficiência espectral

Time-frequency packing (with PM-QPSK)	O espaçamento de canal pode ser menor que a taxa de símbolo: por ex. 8 b/s/Hz	Milhares de km com eficiência de espectro variável: por ex. 3000 km (com 5,16 b/s/Hz), 5500 km (com 4,2 b/s/Hz)	Principalmente conduzido por ADC e DSP (DAC não é necessário), e. largura de banda eletrônica $<0,5 \times$ taxa de transmissão. Um detector de sequência é necessário em vez de um detector símbolo	Transmissão de longo curso com alta eficiência espectral
O-OFDM	Dependente do formato de modulação; o espaçamento de canal é pelo menos igual à taxa de símbolo: por ex. 4 b/s/Hz com PM-4QAM e 8 b/s/Hz com PM-16QAM	Dependente do formato de modulação e do esquema de detecção (vários milhares de km para PM-4QAM e PM-16QAM e CO-OFDM, menos para formatos mais altos ou soluções metropolitanas econômicas)	Principalmente por DAC, ADC, DSP (por exemplo, largura de banda eletrônica $\approx 0,5 \times$ taxa de transmissão)	Núcleo de rede / Longo Curso Metropolitana/regional

*Eficiência espectral é definida como a taxa de informação sobre uma determinada largura de banda.

Módulo Gerador de Subportadora

A geração de n subportadoras é obtida por meio de uma série de lasers ou pelo uso de uma fonte de múltiplos comprimentos de onda. As duas soluções diferentes apresentam vantagens e desvantagens.

A matriz de lasers sintonizáveis evita qualquer restrição no algoritmo de alocação de espectro e roteamento (RSA), principalmente quando a capacidade de particionar é explorada. As subportadoras podem ser geradas em qualquer frequência central, de modo que possam ser usadas em qualquer parte do espectro, dependendo da disponibilidade do slot de frequência ao longo do caminho [33]. Como uma desvantagem, um desvio de frequência de cada laser que compõe a matriz pode precisar de uma banda de proteção (reduzindo a eficiência espectral), a fim de evitar a sobreposição de subportadoras. Normalmente uma instabilidade de laser de 1 GHz pode ser

assumida, e isso pode resultar em uma faixa de proteção de 2 GHz entre duas subportadoras adjacentes. Assim, considerando um supercanal de oito portadores, cerca de 14 GHz seria desperdiçado por causa da deriva do laser.

Por outro lado, uma fonte de múltiplos comprimentos de onda é capaz de produzir n subportadoras a partir de uma única fonte de laser. Logo um desvio na fonte do laser não implica sobreposição indesejada das subportadoras, uma vez que as subportadoras se deslocam em conjunto de acordo com o desvio. Neste caso, a faixa de proteção (de 14 GHz) usada no caso anterior seria evitada, resultando em uma maior eficiência espectral. Além disso, a redução no número de lasers pode reduzir o custo do *S-BVT*. Como desvantagem, as subportadoras geradas por uma fonte de múltiplos comprimentos de onda apresentam restrição na atribuição do espectro. Eles são espaçados simetricamente entre si e o seu espaçamento pode ser limitado a um valor máximo (por exemplo 50 GHz).

Com relação à multiportadora e como providencia-la, os projetos baseados em moduladores podem fornecer a flexibilidade e o desempenho necessários para *S-BVTs*. Um diagrama de blocos do esquemático para uma fonte de múltiplos comprimentos de onda com base no projeto em é mostrado na Fig. 7.3. Um laser integrado sintonizável fornece a portadora que é acoplada com o *Mach-Zehnder modulator* de acionamento duplo (DD-MZM). Um sinal RF senoidal alimentada uma entrada e o dobro dessa frequência na segunda entrada pelo uso do dobrador de frequência. Este projeto tem a capacidade de gerar um número arbitrário de linhas na faixa de 3, 4, 5 e 9 ajustando as amplitudes dos sinais do drive RF, atendendo assim ao requisito de suportar múltiplas taxas. O espaçamento de subportadora (simétrico) pode ser ajustado alterando a frequência de RF e todo o conjunto de subportadoras também pode ser ajustado simplesmente sintonizando o laser que fornece a portadora. Assim que as subportadoras forem geradas, a subportadora apropriada será selecionada e direcionada para o módulo flexível de subportadora correspondente.

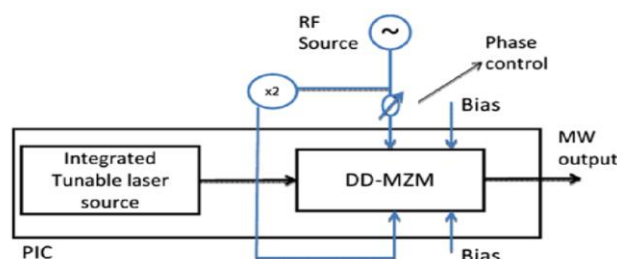


Fig. 7.3 Projeto de fonte de múltiplos comprimentos de onda baseado em moduladores eletro-ópticos. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

Exemplo de um S-BVT suportando 400 Gb/s

A Figura 7.4 mostra a arquitetura *S-BVT* projetada para um *S-BVT* [34] adaptável a códigos, com várias taxas e formatos, capaz de atender demandas a partir de quatro interfaces de 100 GbE. No lado do transmissor, referindo-se à arquitetura *S-BVT* geral mostrada na Fig. 7.2, o Distribuidor de Fluxo é aqui implementado com uma matriz de comutação eletrônica, enquanto o módulo flexível de subportadora, é desacoplado em duas partes: módulo de processamento eletrônico e o Circuito Integrado Fotônico (*PIC*), usado como transmissor de subportadora. A arquitetura permite uma taxa de informação de 400 Gb/s.

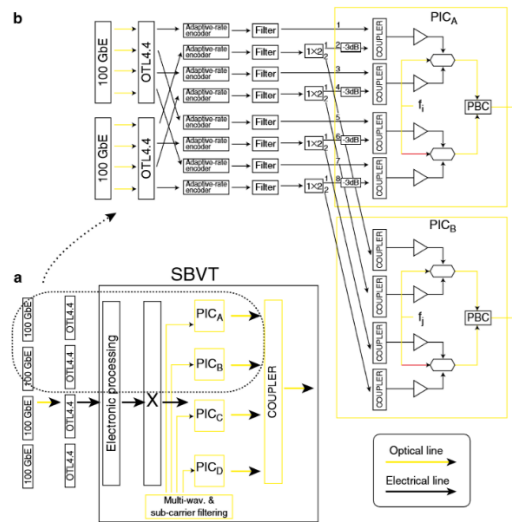


Fig. 7.4 (a) Exemplo de arquitetura *S-BVT* suportando interfaces 4x100 GbE (b) Processo detalhado. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

Como mostrado na Fig. 7.4a, o tráfego de cliente das portas de 100 GbE é encapsulado em quadros OTN, em particular OTL4.4. Então, esses quadros são processados no domínio eletrônico do *S-BVT*. Esse estágio pode envolver filtragem eletrônica ou adição de redundância para a técnica de *Time Frequency Packing (TFP)* (adição de bits de verificação de paridade de baixa densidade - código *LDPC*). O codificador de taxa adaptativa altera a quantidade de redundância na transmissão, satisfazendo o Requisito d para adaptação do código. Então, os clientes codificados entram, através da matriz de comutação nos *PICs* correspondentes para modular sub-portadoras. Subportadoras moduladas são acopladas formando um supercanal

A parte da arquitetura *S-BVT* destacada pela linha pontilhada é expandida na Fig. 7.4b. Cada interface de 100 GbE fornece quatro linhas ópticas *on-off-keying* de 25 Gb/s [35], cada uma encapsulada em uma das quatro linhas OTL4.4. As quatro linhas de 25 Gb/s de uma interface de 100 GbE não são independentes, elas devem modular a mesma subportadora. Em seguida, os clientes *OTN* são codificados e filtrados no domínio eletrônico e direcionados para um *PIC*. Cada *PIC* pode gerar *PM-16QAM* ou *PM-QPSK*, dependendo do tráfego e do alcance óptico necessário, fazendo com que o *S-BVT* transmita diferentes formatos de modulações. Os atenuadores (-3 dB) permitem obter sinais elétricos de quatro níveis (o número mínimo de sinais requeridos para

aplicar o *16QAM*) que modulam a subportadora através do *I/Q modulator*. O *PM-16QAM* pode ser aplicado se oito fluxos de dados forem fornecidos por duas interfaces de 100 GbE para o *PIC*. Para tanto, os interruptores eletrônicos 1×2 são ajustados para sua porta de saída 1 (Fig. 7.4b). Desta forma, duas interfaces de 100 GbE podem ser servidas por um *PM-16QAM* de 200 Gb/s (mais overhead) gerado a partir do *PIC_A* (enquanto o *PIC_B* é excluído). Quatro interfaces de 100 GbE podem ser servidas com um supercanal de 400 Gb/s (mais overhead) alcançado através de dois subportadores *PM-16QAM* de 200 Gb/s, usando dois *PICs* (*PIC_A* e *PIC_C*, enquanto *PIC_B* e *PIC_D* não são usados). Após a modulação do sinal elétrico, o *Polarization Beam Combiner (PBC)* fornece multiplexação de polarização como o último estágio dentro do *PIC*.

Se o *PM-16QAM* não satisfizer o alcance óptico e for necessário um formato de modulação mais robusto, o *PIC* pode ser usado como transmissor *PM-QPSK*, o que é possível utilizando quatro fluxos de dados, em vez de oito. Os quatro fluxos de dados para um único *PIC* usado como *PM-QPSK* são fornecidos por uma única interface de 100 GbE. Para este propósito, os comutadores eletrônicos 1×2 são ajustados para sua porta de saída 2. Desta forma, como mostrado na Fig. 7.4b, o tráfego de clientes vindo de um 100 GbE é direcionado para *PIC_A*, enquanto os clientes provenientes dos outros 100 GbE para *PIC_B*. Assim, graças a switches 1×2 , a arquitetura *S-BVT* proposta preserva a taxa de bits enquanto se adapta a modulação multi-formato (*PM-16QAM / PM-QPSK*). No caso da transmissão *PM-QPSK*, o codificador pode usar o código *LDPC* para *TFP* para aumentar a eficiência do espectro como exemplificado na Tabela 7.1.

No receptor, um receptor coerente deve ser usado para cada subportadora. O mesmo receptor coerente pode ser usado para sub-portadoras com *PM-16QAM* e *PM-QPSK*. Um laser sintonizável usado como oscilador local deve ser ajustado para corresponder ao comprimento de onda do sinal de entrada. Os dois sinais ópticos entram no módulo de conversão opto/eletrônico (*O/E*) fornecendo quatro sinais elétricos analógicos onde a informação é completamente misturada em termos de fase, amplitude e polarização. A conversão analógico-digital (*A/D*) em alta taxa de amostragem, como 50 Gs/s, é realizada e o *PDS* em tempo real é usado para recuperar os dados. O *PDS*, com um equalizador de alimentação bidimensional adaptativo, compensa totalmente as deficiências de transmissão de fibra linear e parcialmente não-linear e fornece um feedback ao *LO* para bloquear sua frequência central ao sinal de entrada. No caso da *TFP*, o receptor troca iterativamente informação com um decodificador *LDPC*. Se a *TFP* for adotada, a interferência inter-símbolo (*ISI*) requer um receptor baseado na detecção de sequência, como o *detector Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv (BCJR)*. Se o *NWDM* for assumido, um detector de símbolo por símbolo pode ser usado. Quatro linhas de saída estão ativas simultaneamente se o *PM-QPSK* for recebido, enquanto oito linhas de saída estão ativas simultaneamente no caso de o *PM-16QAM* ser recebido.

7.2 S-BVT em relação a outras camadas

Nos concentraremos principalmente na camada principal do cliente para a camada *DWDM*, ou seja, a camada IP. Vamos analisar quais as mudanças ocorrem caso aconteça a alteração de BVTs para S-BVTs

Arquiteturas de Camadas IP sem S-BVT

A arquitetura da camada IP funciona da seguinte maneira. Os roteadores se conectam uns aos outros em um plano de comprimento de onda rígido usando transponders com uma taxa de bits fixa por link. Uma abordagem é usar comprimentos de onda de baixa granularidade (10 G), caso em que um grande número deles pode ser usado em paralelo entre roteadores usando um mecanismo de balanceamento. Nesse caso, faz sentido para aumentar a conectividade da topologia IP. Outra variante é usar comprimentos de onda de alta velocidade (100G). Nesse caso, o número de links paralelos entre roteadores é reduzido significativamente, supondo que o tráfego não preencha muitos desses links. Às vezes o nível de tráfego em alguns links é tão baixo que não faz sentido mantê-los na rede, logo conectividade da camada IP é reduzida para garantir que os comprimentos de onda sejam utilizados adequadamente. Uma terceira variante é um híbrido das duas abordagens acima, alguns links usam comprimentos de onda de baixa largura de banda, enquanto alguns usam comprimentos de onda de alta velocidade.

Cada uma dessas opções tem suas desvantagens [36]: usar taxas de transmissão baixas para a rede se reflete em baixa eficiência espectral, reduzindo a utilização de cada conexão, e para o caso taxas de transmissão altas pode ainda implicar uma menor utilização dos links IP, pois há um limite para permitir a redução na conectividade: a topologia da rede deve estar suficientemente conectada para fornecer confiabilidade. A abordagem híbrida, embora mais econômica pode ser difícil de operar devido às diferentes gerações de tecnologia usadas (por exemplo, requerendo bandas de proteção para comprimentos de onda de 10 G).

Uma abordagem alternativa é a utilização da multiplexação da camada de transporte elétrica para o agrupamento de comprimento de onda além dos comprimentos de onda transmitidos a altas taxas. Essa arquitetura tenderá a usar um número menor de comprimentos de onda de alta velocidade para utilizá-los quando realmente for necessário, e dependerá de *OTN* ou *MPLS-TP* para criar conexões de entre roteadores que não são diretamente conectados por um sinal óptico. O custo desta solução não será necessariamente menor do que as soluções fornecidas pela arquitetura de multiplexação de comprimento de onda óptica devido à camada elétrica adicionada, a óptica cinza conectando o roteador ao switch e, o mais importante, os transponders *DWDM* usados para passar uma *OTN/MPLS-TP* através de cada switch da rota para o destino. Em resumo, essa abordagem substitui as portas do roteador por switch *MPLS-TP* ou portas de conexão

cruzada *OTN*, mas não economiza em transponders *DWDM*. Isso tudo com transponders de taxa de bits fixa ou mesmo com *BVTs* viabilizando o *trade-off* entre alcance de transmissão e capacidade, ambos os casos mudariam pouco o desempenho.

Assim como no caso de transponder fixo, a conectividade da camada *IP* sobre *BVTs* é determinada pela razão entre a capacidade e as necessidades de tráfego no comprimento de onda: se os comprimentos de onda tiverem alta capacidade, faz sentido economicamente ter um espaço mais esparsos. Topologia *IP* e se os comprimentos de onda tiverem menor capacidade, faz sentido ter uma rede *IP* mais densa. Assim, a topologia *IP* é acoplada à capacidade de comprimentos de onda. Essa é uma restrição de design indesejável, a rede pode ter melhor desempenho se esses dois fatores forem independentes um do outro. Observe que a abordagem de multiplexação de transporte elétrico permite o desacoplamento da topologia *IP* da capacidade de comprimento de onda: é possível alocar a capacidade necessária a um link *IP*, independentemente de restrições ópticas, mas isso é feito no domínio elétrico e oferece benefício econômico. Uma portante indagação a ser respondida, o mesmo desacoplamento pode ser alcançado na camada óptica a um baixo custo?

Como o S-BVT permite uma melhor arquitetura de camada IP?

Uma das principais vantagens dos *S-BVTs* é que eles permitem o desacoplamento desejado da alta densidade de sinais da camada *IP* e da capacidade suportada por um transponder comum. Isso ocorre porque o *S-BVT* pode ser dividido com base nas necessidades de capacidade para criar vários enlaces independentes entre os roteadores. Se os roteadores precisam de menos do que a capacidade máxima oferecida por um *S-BVT*, apenas uma parte do *S-BVT* é alocada para este enlace, e o restante pode ser usado por outros enlaces para outros destinos.

Considere o exemplo de três topologias de camadas *IP*, cada um usando dois *S-BVTs* por nó. Todos os três projetos são viáveis para a mesma rede e têm o mesmo custo, mas possuem propriedades diferentes de uma perspectiva de camada *IP*. Com *S-BVTs*, o projetista de *IP* pode ficar livre de considerações de custo ao escolher a rede *IP* ideal para suas necessidades. No entanto, o potencial total dos *S-BVTs* se manifesta em uma rede dinâmica. Em tal rede, a topologia *IP* pode passar de uma topologia para outra topologia em resposta a uma mudança no padrão de tráfego ou a uma falha. Isso é valioso, pois permite a adaptação da rede às necessidades do tráfego usando uma quantidade mínima de recursos, em vez de provisionar cada um dos links para suportar as alterações no tráfego. Deve-se notar que tal comportamento dinâmico é possível em uma rede com um grande número de conexões de baixa capacidade, mas com baixa eficiência espectral e alto custo. Conforme os operadores fazem a transição para a arquitetura, ao fazer a transição para 100 G, eles podem perder a capacidade de alterações dinâmicas na rede, pois o número de links na topologia é muito baixo para permitir alterações de topologia. Os *S-BVTs*

permitem essa funcionalidade sem as desvantagens de um grande número de comprimentos de onda de baixa velocidade, permitindo ainda a transição para comprimentos de onda de alta capacidade.

Como interconectar roteadores e S-BVTs

Se seguirmos a mesma abordagem que é usada hoje com transponders fixos, o cliente deve estar conectado ao transponder usando um link ponto-a-ponto de capacidade fixa. Como resultado, um transponder flexível para destinos diferentes será inútil, já que a interface do cliente na camada óptica não tem essa flexibilidade. Portanto, a interconexão entre as camadas deve ser feita de maneira diferente.

Algumas opções de interconexão são abordadas. Algumas opções são baseadas em interfaces de taxa fixa, com granularidade fina (10 GE) ou maior granularidade (100 GE). O S-BVT pode mapear um número variável dessas interfaces em um único caminho óptico para obter a flexibilidade desejada. Isso é feito através de multiplexação *TDM* (tipicamente *OTN*). Enquanto a opção de granularidade mais fina fornece maior flexibilidade na topologia da camada IP, ela sofre de um grande número de ligações, trazendo certa complexidade operacional, afetando a densidade dos S-BVTs. A opção de maior granularidade não sofre com essa complexidade operacional, mas pode não ser flexível o suficiente para suportar a conectividade IP desejada, especialmente se o tráfego geral da rede for relativamente baixo. Uma melhor solução é baseada em interfaces canalizadas entre os sistemas. Isso permite uma única interface física que é logicamente dividida em vários canais. Isso também permite granularidade mais flexível.

A abordagem mais comum para canalizar links de transporte em multiplexação *TDM* e o padrão atual para essa tecnologia é a *OTN* (*Optical Transport Network*), definido pela *ITU*. Um exemplo típico para a multiplexação *OTN* seria o mapeamento de um sinal Ethernet de 10 G na carga útil de um *ODU2*. Dez desses *ODU2s* podem então ser mapeados em um *ODU4*, que pode ser transportado em um comprimento de onda de 100 G (em um *OTU4*).

7.3 Planejamento da Rede Usando S-BVTs

Exemplo de Planejamento de Rede

A Fig. 7.5 mostra o número de transponders necessários em duas situações diferentes: usando transponders não particionáveis e usando S-BVTs. Os transponders não particionáveis são fixos ou BVTs. Vamos supor que o objetivo do processo de planejamento seja minimizar a capacidade implantada na rede.

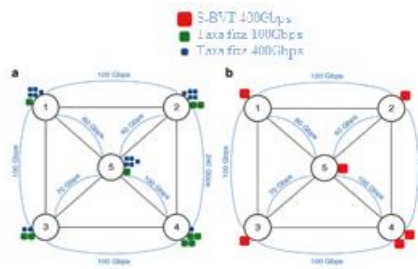


Fig. 7.5 Exemplo de transponders requeridos em uma rede para suprir o tráfego demandado. (a) Com transponders não particionáveis, (b) com S-BVT. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

Por exemplo, no nó 1 no caso (a) seis transponders são necessários para suprir todas as demandas, ou seja 3×40 Gb/s para fornecer tráfego 1 a 2, 1×100 Gb/s para fornecer tráfego 1 a 3 e 2×40 Gb/s para fornecer tráfego de 1 a 5. Em comparação, no caso (b), seria suficiente apenas um S-BVT 1×400 Gb/s com granularidade de 40 Gpbs no nó 1 para fornecer o mesmo tráfego, pela vantagem do S-BVT adaptar ao tráfego (uma portadora para cada destino). O nó 4 requer dois S-BVTs porque suas demandas são de 440 Gb/s. No caso de todas as demandas de/para um nó serem de 400 Gb/s se mais de dez portadoras fossem necessárias, seriam necessários dois ou mais S-BVTs, uma vez que o número de portadores em cada S-BVT é dez.

Definição de Programação Linear Inteira Mista (MILP)

A configuração otimizada para atingir o menor número de transponders é um problema clássico no campo da engenharia que tenta minimizar ou maximizar uma certa função de custo ao mesmo tempo que satisfaz as restrições do problema. A definição do problema do MILP é baseada na formulação do link-node apresentado na capítulo 4. A diferença está no tipo de transponder.

Economias Esperadas com o uso de S-BVTs

Com o MILP resolvido, alcançamos o objetivo de minimizar o número de transponders na rede. As vantagens dessa solução são apresentadas a seguir:

Definição do Cenário

Para quantificar os benefícios da otimização da topologia, dois cenários são comparados: (1) topologia de rede atual e (2) topologia otimizada. A topologia de rede atual é baseada nas demandas de IP de uma rede básica de IP real. O tráfego é roteado por toda a rede

usando o caminho mais curto clássico em termos de número de saltos na camada IP. O cenário ideal considera uma topologia otimizada, na qual o é possível alterar a rota pela demanda do tráfego. Além de comparar o número de transponders, também comentamos os efeitos de diferentes granularidades de S-BVTs. O problema definido acima foi aplicado ao backbone representado na Fig. 7.6. [37]

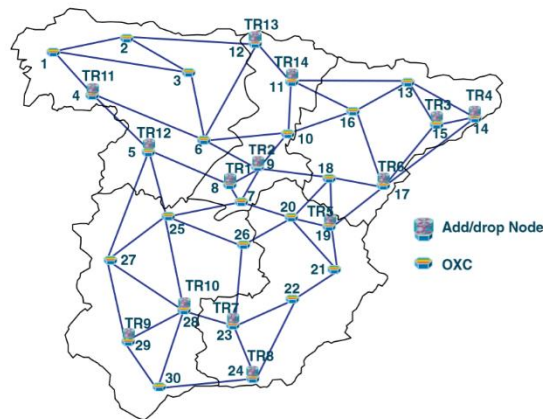


Fig. 7.6 Rede de referência baseada no backbone nacional espanhol. Retirado de [37]

A matriz de tráfego inicial é criada com base nas informações da rede de backbone da Telefonica em 2013, encontradas em [37]. O dimensionamento de link é feito com um fator de superdimensionamento de 30%. O tráfego é incrementado anualmente por um fator de 50%, a fim de comparar os resultados para os diferentes tipos de transponders propostos ao longo dos próximos 5 anos (de 2013 a 2018) em um cenário realista.

Impacto no Número de Transponders

Os resultados foram obtidos para as duas topologias mencionadas (IP e otimizada) para diferentes valores de granularidade, 10, 40 e 100 Gb/s. A capacidade selecionada do S-BVT é ajustada para 400 Gb/s. No caso de granularidade igual a 40 Gb/s cada transponder tem dez portadores (10×40 Gb/s). Isso permite enfrentar demandas mais baixas do que com granularidade de 100 Gb/s. A razão é que haverá apenas quatro operadoras por transponder, pois a capacidade total é de 400 Gb/s. A Tabela 7.2 representa o número de transponders requeridos por cada caso de 10, 40 e 100 Gb/s de granularidade e para cada topologia. Observamos que muito mais transponders são necessários quando a granularidade é maior, mas o mais importante é que o número de transponders é praticamente o mesmo no caso da topologia otimizada. Há uma pequena diferença observada quando a granularidade passa de 10 para 100 Gb/s.

Tabela 7.2 Número de S-BVTs por ano para diferentes topologias e granularidades

Year	Granularity = 10 Gb/s		Granularity = 40 Gb/s		Granularity = 100 Gb/s	
	IP	Opt	IP	Opt	IP	Opt
2013	24	22	24	22	38	24
2014	32	32	34	32	44	33
2015	40	40	44	40	56	44
2016	62	60	62	60	68	62
2017	84	80	88	80	90	80
2018	120	114	120	115	130	118

Além das vantagens que a otimização de topologia representa, a topologia otimizada também tem outra vantagem sobre a topologia IP. Olhando novamente para os seus resultados, é possível observar que, em qualquer caso, a topologia otimizada sempre precisa de um número menor de transponders.

Capítulo 8 Plano de Controle GMPLS

O plano de controle é o software que controla dispositivos na rede, como dispositivos de comutação, moduladores e *BVTs*, em tempo real e mantém a visão de uma “rede”. O plano de controle é capaz de reagir a mudanças na rede, a partir dos procedimentos do plano de controle, os quais são acionados para executar funções e assim descartar intervenção humana. O plano de controle mantém uma visão do estado dos dispositivos e faz um conjunto de abstrações úteis. Por exemplo, o plano de controle tem que gerenciar um *WSS*, programar a forma de um filtro ou ajustar o comprimento de onda do transponder. Assim quando os componentes ópticos são configurados, os dados podem ser enviados de um transponder para outro através da *EON*. O plano de controle abstrai uma configuração particular dos elementos da rede e tem a noção de “conexões”. As principais funcionalidades que o plano de controle fornece são:

- Provisionamento (configuração e desativação) das conexões: O plano de controle configura automaticamente todos os dispositivos necessários para criar uma conexão entre dois (ou mais) pontos na rede. Esse processo é conhecido como sinalização.
- Restauração: Em caso de falha em algum elemento da *EON*, uma conexão pode não conseguir mais atender à qualidade necessária para o serviço transmitido. Nesse caso, por meio do processo de restauração, a configuração da rede é alterada para que a conexão atenda novamente à qualidade desejada. O processo de restauração geralmente implica uma mudança no caminho óptico de uma conexão.
- Descoberta de elementos: o plano de controle descobre automaticamente quais elementos estão presentes na rede.
- Roteamento: o plano de controle constrói automaticamente uma visão topológica da rede; descobre as conexões entre os elementos da rede e mantém as informações atualizadas. Com essa descoberta, um grafo é composto de nós e arestas é construído como uma abstração da topologia. Além disso, informações de *Traffic Engineering (TE)* como, espectro disponível e informações de riscos sobre um link compartilhado representando uma fibra também são adicionadas ao grafo.
- Computação de caminho: Com base no grafo da rede, capacidades de engenharia de tráfego de ambas as arestas (por exemplo, disponibilidade de espectro) e vértices (ou seja, matriz de conectividade entre arestas de entrada/saída), o caminho de um serviço é calculado. Restrições e objetivos de otimização, como custo, podem ser aplicados ao cálculo.

O plano de controle é baseado na comunicação entre os elementos de controle para obter as funcionalidades desejadas, e essa comunicação é definida por protocolos, os quais são formatos bem definidos para troca de mensagens que focam em funções específicas. Por exemplo, na arquitetura *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)* [38], a sinalização é

realizada usando o protocolo *Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering (RSVP-TE)* [39].

Os protocolos do plano de controle têm a sintaxe incorporada no protocolo, definindo as mensagens e a estrutura de dados a serem trocadas. A tendência é construir protocolos de plano de controle diretamente sobre IP ou TCP, projetados para trabalharem em tempo real, mesmo com elementos de rede que tenham pouca capacidade computacional. Por esse motivo os protocolos tendem a simplicidade.

8.1 Arquitetura do Plano de Controle GMPLS

Introdução à arquitetura GMPLS/PCE

O objetivo original do *GMPLS* era controlar múltiplas tecnologias de chaveamento orientadas a circuitos, como por exemplo a multiplexação por divisão de tempo (*TDM*) e comutação de fibra.

O plano de controle *GMPLS* estabelece os *Label Switched Paths (LSPs)*, roteados a partir de um conjunto de restrições da engenharia de tráfego. As restrições são usadas para atingir os principais objetivos da TE, como otimização do uso de recursos, garantia de QoS e recuperação rápida de falhas.

Esse plano de controle consiste em três princípios: (1) disseminação de roteamento e topologia, responsável pela descoberta da topologia de rede e atributos em um determinado domínio, (2) computação de caminho, responsável por calcular o caminho da rede e os recursos necessários e (3) sinalização, responsável pelo estabelecimento de *LSP* (reserva de recursos), conduzindo a comutação e encaminhamento dos elementos de rede. Tais princípios permitem ocorrer as seguintes funções: projeção de caminho (o que requer cálculo de rota e reserva de recursos), Modificação de *LSP*, com a opção de modificar atributos selecionados sem derrubar o *LSP*, re-roteamento de *LSP* que permite alterar as rotas *LSPs* já configuradas e prioridades *LSP*, a fim de lidar com diferentes classes de serviço ou prioridades. O *GMPLS* permite que um nó que está transmitindo sugira um rótulo (comprimento de onda) a um nó que está recebendo uma mensagem para reservar e configurar seu hardware com o comprimento de onda proposto pelo nó de origem para o nó de destino, por meio do rótulo sugerido.

Um plano de controle *GMPLS* é composto por controladores (geralmente um por nó) que executam vários processos colaborativos, como ilustrado na Fig. 8.1. Os principais componentes são o Controlador de Conexão e o Controlador de Roteamento e um componente de computação de caminho. Cada controlador *GMPLS* gerencia o estado de todas as conexões, ou seja, os *LSPs* originadas, terminadas ou passando por um nó, e armazenadas no *LSP-Database*

(*LSPDB*), que mantém suas próprias informações de estado de rede (topologia e recursos), em banco de dados de engenharia de tráfego (*TED*).

O controlador de roteamento é responsável por disseminar alterações ocorrendo no estado da rede através do protocolo de roteamento *GMPLS* (*Open Shortest Path First*) *OSPF-TE*, permitindo que os controladores de roteamento dos nós atualizem seus *TEDs* locais e mantenham uma imagem global da topologia de rede atual e disponibilidade de recursos. Depois de uma mudança de estado de rede, o nó que originou a mudança envia um aviso *TE - Link State Advertisement* (*TE LSA*) para todos os seus nós vizinhos. Os nós vizinhos recebem os *TE LSAs*, os encaminham e atualizam seus *TED*, esse mecanismo permite a sincronização dos *TED* de todos os nós, de modo que todos os controladores de roteamento de nó tenham uma única visão do estado da rede em um determinado período, chamado de tempo de convergência do roteamento.

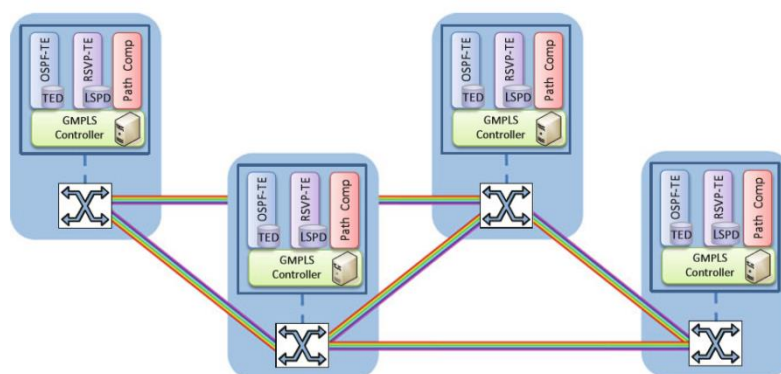


Fig 8.1 Rede óptica controlada por GMPLS. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

O controlador de conexão é responsável por reservar, modificar, reencaminhar ou liberar as conexões ópticas através do protocolo de sinalização *GMPLS RSVP-TE*. O mecanismo de sinalização *GMPLS RSVP-TE* consiste em uma solicitação de rótulo dentro de uma mensagem *RSVP PATH* da origem para o nó de destino (direção de encaminhamento) e uma atribuição generalizada de rótulo (reserva) enviada em uma mensagem *RSVP RESV* o nó de origem (direção contrária). Esta troca de mensagens de sinalização permite que cada controlador de conexão envolvido atualize seu repositório *LSPDB*.

Finalmente, cada controlador *GMPLS* pode executar algoritmos de computação de caminho eficiente/ótimo para encontrar um caminho viável se baseado nas informações de estado da rede. Assim, após um pedido de conexão no nó de origem, tal nó executa um algoritmo de computação de caminho para encontrar um caminho viável. O caminho calculado é passado para o controlador de conexão como *Explicit Route Objects* (*EROs*). Como alternativa, a função de cálculo de caminho pode ser delegada a entidades dedicadas, denominadas *Path Computation Elements* (*PCEs*).

A atribuição de espectro em redes ópticas *DWDM flexgrid*, envolve o cálculo de uma rota física, mas também de um espectro óptico contíguo (ou seja, um slot de frequência) e um conjunto de parâmetros de modulação. como o formato de modulação, bits por símbolo, o número de subportadoras *OFDM* ou a *FEC (Forward Error Correction)*, para configurar os transmissores e receptores ópticos elásticos. Isso é chamado de roteamento, modulação e atribuição de espectro (*RMSA*) ou simplesmente *RSA*.

O *PCE (Path Computation Elements)* sem estado é uma entidade (componente, aplicativo ou nó de rede) capaz de calcular um caminho com base em um grafo de rede (*TED*) e aplicar restrições. A ideia é desacoplar a função de computação do caminho dos controladores *GMPLS* em um *PCE* centralizado e dedicado com uma interface e um protocolo abertos e bem definidos. Ao fazer isso os Controladores *GMPLS*, podem solicitar o cálculo de uma rota explícita, como mostrado na Fig. 8.2.

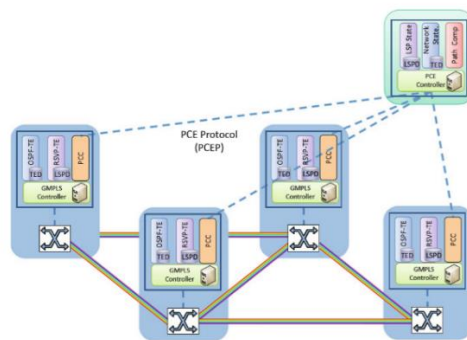


Fig. 8.2 Rede óptica controlada por GMPLS com computação de caminho baseada em PCE único. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

Quando um operador precisa provisionar/reencaminhar um *LSP* novo/existente, ele usa o protocolo *PCE (PCEP)* para enviar uma mensagem de Solicitação de Computação Path (*PCReq*) para o *PCE*. A mensagem *PCReq* especifica os terminais (endereços de nó de origem e destino) e as funções de objetivo (critérios de algoritmo/otimização solicitados) e as restrições associadas, como parâmetros de tráfego (por exemplo, largura de banda solicitada), capacidade de comutação e tipo de codificação. Também é possível incluir ou excluir nós de rede, links ou domínios inteiros (*Include Route Object, IRO* e *Exclude Route Object, XRO*) ou re-otimizar caminhos existentes evitando reservas duplas de recursos.

Uma mensagem *PCReq* pode solicitar o cálculo de um caminho ou um conjunto de caminhos. O uso da lista *VECTOR* de Sincronização (*SVEC*) na mensagem *PCReq* permite solicitar computação sincronizada, ou seja, o *PCE* evita atribuir os mesmos recursos aos caminhos computados anteriores do mesmo conjunto. Em ambos os casos, cada solicitação de cálculo de caminho incluída no *PCReq* solicita uma função objetiva específica e define algumas restrições. Se o cálculo do caminho for bem-sucedido, o *PCE* responde (mensagem *PCRep*) com os

- CS: a indicação de espaçamento de canal (por exemplo, 50/100, 6,25 GHz no caso de grade de sinal de corrente).
- Identificador: atributo local de diferentes lasers operando nas mesmas frequências.
- n: A frequência central do slot, expressa como um offset inteiro da frequência de referência de 193,1 THz. O valor é calculado como frequência central = 193,1 + CS * n THz.
- m: A largura do slot, expressa como um número inteiro múltiplo do slot de frequência básica 2 * CS. O valor é expresso como largura do slot = m * 2 * CS GHz.

Esse rótulo é empregado em mensagens Path e Resv. Em mensagens Path, ele pode ser transportado sempre que a atribuição de espectro for pré-computada ou sugerida antes na fase de sinalização (por exemplo, quando o espectro é computado no nó de origem ou por um PCE) e no caso de controle explícito de rótulo (ELC) quando o rótulo é colocado no objeto ERO). Em mensagens Resv, o rótulo flexgrid é usado no rótulo de reserva para realizar a configuração do filtro na interface de saída selecionada. Observe que o rótulo estendido também pode ser aplicado à grade fixa padrão e às redes DWDM herdadas.

No *GMPLS* padrão, o tipo solicitado de reserva de recursos (por exemplo, tipo de sinal, tipo de hierarquia, taxa de bits nominal) é executado dentro do objeto *SENDER_TSPEC*, contido em mensagens Path. Em *EON*, a reserva de recursos solicitada corresponde à largura do slot de frequência, identificada unicamente pelo parâmetro m. Da mesma forma, o recurso de reserva estendida é executado no objeto *FLOWSPEC*, contido em mensagens Resv.

Finalmente, o objeto LabelSet deve ser estendido para descrever as porções de espectro disponíveis e reserváveis. As possíveis estruturas de informação usadas para descrever o conjunto de rótulos podem ser obtidas de várias maneiras, conforme proposto em [41]:

- Lista inclusiva / exclusiva
- Faixa inclusiva / exclusiva
- Conjunto de bitmap

Como no *flexgrid* o número de frequências centrais disponíveis pode ser alto (devido ao espaçamento de canal reduzido), o conjunto de bitmaps é um forte candidato para representar o conjunto de rótulos de uma maneira compacta, eficaz e de tamanho fixo. Em particular, neste caso, matrizes de valores booleanos (ou seja, palavras de bitmap) descrevem frequências centrais nominais (bit 0: ocupado, bit 1: livre), começando a partir de uma frequência central nominal base identificada por um rótulo base

Computação de Caminho em Redes Flexigrid

Em *EON*, o cálculo do caminho representa um aspecto chave; ela permite os benefícios das novas capacidades dos transponders e a nova granularidade da grade flexível. Com relação ao padrão WSON, o número de parâmetros de entrada/saída de um LSP habilitado por *EON* é potencialmente maior. Por fim, como nas redes ópticas de redes fixas, o cálculo do caminho efetivo está estritamente relacionado com a validação de restrições e pode exigir informações adicionais, normalmente disponíveis no plano de gerenciamento. Por todo o motivo mencionado, um esforço especial foi dedicado a propor soluções compatíveis com o cálculo de caminho centralizado, realizado pelo PCE.

Devido a demanda do *flexgrid*, as extensões propostas para protocolos de roteamento (por exemplo, extensões OSPF-TE para *flexgrid*), o PCE pode recorrer ao TED com informações de estado do enlace na granularidade do *flexgrid*. Por exemplo, ciente das frequências centrais ocupadas com a granularidade do espaçamento de canal considerado (por exemplo, 6,25 GHz). Esse TED estendido permite o cálculo de caminho restrito para requisitos típicos de redes ópticas (por exemplo, restrição de continuidade de espectro para LSPs transparentes). Diferentes arquiteturas de PCE são suportados:

- Roteamento conjunto e sugestão/atribuição de espectro (RSA) dentro de um único PCE com um algoritmo combinado.
- Roteamento separado e sugestão/atribuição de espectro (R + SA) executados com algoritmos independentes ou em diferentes PCEs dedicados.
- Encaminhamento realizado no PCE e atribuição de espectro distribuído pelo protocolo de sinalização (R + dSA).

Vários algoritmos de computação de caminho de roteamento (por exemplo, caminho mais curto, caminho menos congestionado) disponíveis na literatura para o WSON podem ser estendidos, incluindo as restrições adicionais, para suportar a nova granularidade *flexgrid*.

O cálculo do caminho baseado em PCE, como em WSON para a sugestão de comprimento de onda, pode também incluir a sugestão do espectro (por exemplo, nos esquemas R & SA e R + SA). Em uma *EON*, o rótulo do *flexgrid* inclui não apenas a frequência central sugerida (n), mas também a largura do slot de frequência (m). Neste caso, duas opções de sugestão de espectro baseadas em PCE podem ser consideradas:

- Sugestão de frequência central, dada uma largura de slot de entrada
- Sugestão de frequência central combinada e largura de slot

Isso representa uma das principais extensões do cálculo do caminho baseado em *EON* em relação ao WSON. De fato, a mensagem de solicitação de computação de caminho (PCReq)

transporta o objeto BANDWIDTH especificando a quantidade de largura de banda requerida pela conexão. Se o objeto de largura de banda tiver uma largura de slot de espectro de entrada (m), a primeira opção será considerada. Por outro lado, se transportar uma taxa de bits solicitada (expressa em Gb/s), a segunda opção é considerada. Para o primeiro caso, o PCE calcula a sugestão de frequência central com base em uma solicitação de cálculo de caminho, incluindo uma restrição na largura do canal. Assim, neste caso, m é uma entrada do cálculo do caminho. Essa opção pode ocorrer sempre que uma quantidade pré-determinada de espectro for necessária para a conexão (por exemplo, conexão compatível com nós habilitados de rede fixa). Para o segundo caso, o PCE calcula a frequência central e a largura do slot de frequência. Com base na taxa de bits solicitada, os recursos/capacidades dos transponder equipados nos nós de origem e de destino devem ser considerados na seleção de m . Diferentes estratégias podem ser adotadas durante o processo de cálculo: m pode ser selecionado referindo-se a uma tabela de consulta rígida (para qualquer taxa de bits solicitada é selecionada uma certa largura de slot) ou a uma tabela de consulta flexível (para um dado taxa de bits solicitada, são possíveis valores diferentes de m). A tabela de consulta flexível é empregada se os nós de rede suportarem BVTs, ou seja, incluindo a capacidade de adaptar parâmetros de transmissão (por exemplo, formato de modulação e codificação), de acordo com o alcance óptico necessário. De fato, dada uma taxa de bits, quanto mais eficiente for o formato de modulação para o espectro ocupado, menos robusto o sinal se torna em termos de qualidade de transmissão (QoT) (o que, por sua vez, determina o alcance óptico total). Como exemplo, a modulação em amplitude de 16-quadratura (16-QAM) reduz pela metade a ocupação de espectro requerida em relação ao chaveamento de mudança de fase em quadratura (QPSK), mas o 16-QAM apresenta um alcance óptico limitado em relação a QPSK. Como consequência, para uma determinada taxa de bits solicitada (por exemplo, 200 Gb / s), diferentes valores m podem ser selecionados, com base no formato de modulação selecionável, códigos, e outros parâmetros de transmissão, que podem ser uma saída do RSA [24]. Assim, o protocolo PCEP deve incluir informações de formato de modulação, na mensagem PCReq como nas redes ópticas tradicionais, para comunicar restrições de transponder e, além disso, deve indicar a solução selecionada.

Na EON, como no WSON, o cálculo do caminho é ainda mais complicado pela necessidade de levar em conta os *impairment* físicos. Um número de parâmetros físicos de ponta a ponta deve ser considerado para avaliar a QoT esperada. Várias arquiteturas baseadas em PCE para RSA foram propostas como uma solução e validadas com sucesso:

- *Impairment Validation* (IV) e Processo RSA (IV e RSA): os processos de validação de *impairment* e RSA são agregados num único PCE .
- Candidatos-IV + Processo RSA (Candidato IV + RSA): a validação da impedimentos e os processos de RSA são separados e realizados por duas entidades diferentes do PCE. Nesse caso,

o IV PCE fornece ao RSA PCE um conjunto de caminhos candidatos validados com QoT garantido. Assim, o IV PCE explora informações de parâmetros físicos além das informações de roteamento. Em seguida, o RSA PCE executa RSA no conjunto validado sem considerar parâmetros e QoT.

- Roteamento + Atribuição de Espectro Distribuído e IV: um PCE, inconsciente de informações de disponibilidade de recursos de espectro e parâmetros físicos, é assumido. A atribuição de espectro e a validação de restrições são realizadas de forma distribuída, explorando extensões de protocolo de sinalização ou roteamento.

Enquanto que com IV distribuído, todos os nós da rede devem armazenar parâmetros físicos da rede, com IV centralizado é apenas o PCE que é necessário para armazenar (em algum banco de dados especial) e manter parâmetros físicos. Assim, IV & RSA e Candidatos-IV + RSA amenizam a quantidade de informação armazenada nos nós. Além disso, nesses casos centralizados, os recursos de rede são tipicamente melhor utilizados. Por outro lado, a rede pode não ser capaz de operar de forma autônoma (por exemplo, no caso de uma falha de PCE).

Capítulo 9 Software Defined Networking

O *Software Defined Networking (SDN)* surgiu recentemente como uma arquitetura de rede que permite uma abstração da infraestrutura da rede e a programação de funções de encaminhamento.

9.1 Arquitetura SDN

Conceitos Gerais

O conceito de uma SDN, é baseada em uma abstração da rede, simplificando a arquitetura em problemas de programação, de escrita e manutenção de software. A abstração é definir dados e programas com uma representação do seu significado, enquanto ocultam os detalhes da implementação.

O SDN redesenha a arquitetura das redes para que elas operem de maneira semelhante à das arquiteturas de computadores [42]. Como mostra a Figura 9.1, as arquiteturas de computadores têm um hardware genérico capaz de hospedar diferentes sistemas operacionais, ou seja, o hardware é separado do sistema operacional. Da mesma forma, o sistema operacional é genérico e capaz de suportar uma grande variedade de aplicativos sobre ele, analogamente, o sistema operacional é separado dos programas. Programadores são capazes de implementar sistemas complexos sem ter que lidar com os aspectos técnicos de dispositivos individuais ou com linguagem de máquina, graças à aos níveis de abstração acima mencionados.

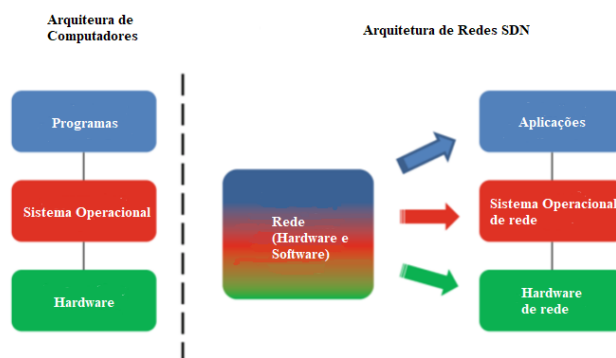


Fig. 9.1 Arquitetura SDN (esquerda), e a arquitetura integrada a particionada (direita). Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

O mesmo conceito de separação pode ser aplicado as redes. Como mostrado na Fig. 9.1, a maioria das redes atuais tem software altamente integrados ao hardware de rede e qualquer modificação de hardware pode exigir modificação do software relevante do dispositivo. A evolução desejada é uma separação do elemento básico de um elemento de rede, o hardware e o

software serão divididos em sistema operacional de rede que pode hospedar diferentes programas. Essa abordagem facilita a programação de elementos de rede e a substituição de qualquer um dos blocos lógicos na separação.

Separação Lógica do SDN

A Figura 9.2 mostra uma visão lógica da arquitetura SDN. Três camadas são identificadas: uma camada de aplicação, uma de controle e uma camada de infraestrutura. O paradigma SDN prevê uma arquitetura onde os dispositivos de rede (roteadores, switches, nós ópticos, etc.) se tornam programáveis. Este objetivo é realizado através da abstração implementada por interfaces de controle, conhecidas como Interfaces de Programação de Aplicações (*APIs*). A interface entre a Camada de Aplicação e de Controle é chamada de interface northbound e é especificada pela *API*, enquanto a interface entre a camada de controle e infraestrutura é a interface southbound, definida por várias especificações de protocolo, sendo o *OpenFlow* [43] o mais popular.

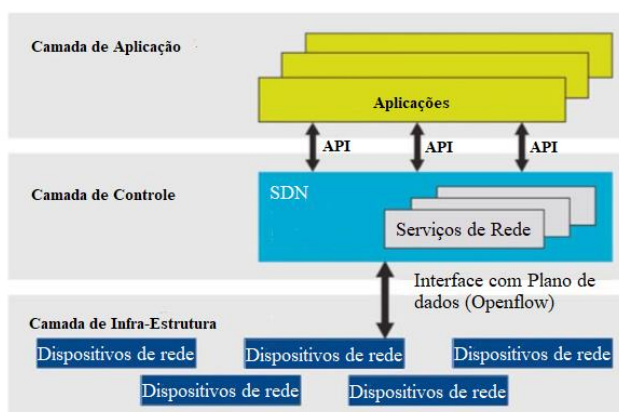


Fig. 9.2 Arquitetura de referência SDN. Retirado de *Elastic Optical Networks* [48]. Adaptado de *Elastic Optical Networks* [2]

O controle da rede é centralizado nos controladores SDN, que mantêm a visão global da rede, como resultado, a rede aparece para os aplicativos e mecanismos de políticas como um único switch lógico. O SDN também simplifica muito os dispositivos de rede, eles não precisam mais processar protocolos, apenas aceitar instruções dos controladores SDN [44].

A abordagem centralizada para a camada de controle tem várias vantagens: visão única da rede, sem necessidade de sincronização, e como desvantagem, dificuldade para localizar falhas e recuperação das mesmas.

9.2 Protocolo OpenFlow

A arquitetura SDN engloba diferentes tecnologias entre o controle e a camada de infraestrutura, entre eles o protocolo *OpenFlow*. Esse protocolo foi originalmente projetado para comutação de pacotes, permitindo que um controlador configure as tabelas de encaminhamento dos elementos de rede. Um controlador *OpenFlow* normalmente gerencia vários switches *OpenFlow* sendo que um switch *OpenFlow* pode ser controlado por um ou mais controladores. Por meio do *OpenFlow*, um controlador pode adicionar, atualizar e excluir as entradas das tabelas de fluxo de forma reativa (em resposta a pacotes) ou de forma proativa. Múltiplas tabelas de fluxo por comutador (*switch*) podem ser suportadas. Cada tabela de fluxo contém um conjunto de entradas e cada entrada possui três campos: campos de correspondência, contadores e instruções (Fig. 9.3).

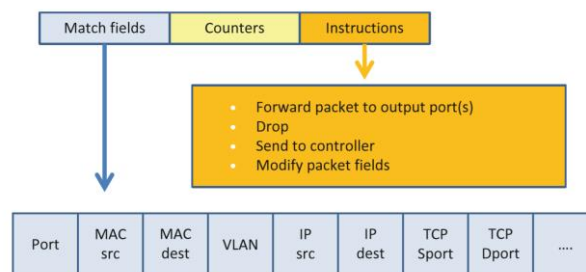


Fig. 9.3 Componentes de uma entrada de uma tabela de fluxo. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

Quando um pacote chega, uma pesquisa na tabela de fluxo é executada. Se uma correspondência for encontrada, as instruções associadas serão executadas (por exemplo, encaminhamento em direção a uma porta de saída específica) e os contadores relacionados atualizados. Caso contrário, dependendo da configuração de falha da tabela de fluxo, o pacote poderá ser encaminhado para o controlador através do protocolo *OpenFlow*.

O *OpenFlow* tem a capacidade de definir de maneira única uma combinação entre as entradas em uma tabela de fluxo e as instruções relacionadas de acordo com os campos de pacotes, permitindo que um elemento de rede *OpenFlow* execute qualquer ação na rede, sem exigir como nas redes atuais, dispositivos dedicados para *switches* de camada 2, roteadores, *switches* de camada 7, *firewalls* etc. Por exemplo, o comportamento de *um switch* de camada 2 pode ser conseguido configurando a correspondência de fluxo de acordo com os endereços MAC, um roteador de acordo com os endereços IP e um comutador de camada 7 de acordo com outros cabeçalhos de pacote. Além disso, o comportamento de um *firewall* pode ser alcançado incluindo-se a ação correspondente ao pacote, em vez de seu encaminhamento, o pacote é removido, além de *multicast* e *broadcast* serem suportados pela especificação de várias portas de saída.

Para suportar tal comportamento, o protocolo *OpenFlow* conta com as seguintes funcionalidades:

- Canal seguro entre o controlador e o elemento de rede. Por meio desse canal criptografado, o controlador configura e gerência o *switch* e suas entradas de fluxo, recebendo eventos e estatísticas do *switch* e enviando pacotes para fora do *switch* (por exemplo, para descoberta de topologia).
- Tabelas de fluxos, grupos, ações a serem tomadas e processamento de pipeline são introduzidos para suportar conjuntos de instruções e melhorar a escalabilidade.
- Portas físicas e lógicas são definidas.
- Remoção de fluxo: um mecanismo permite que o comutador remova entradas não usadas, após expirar o tempo limite.
- Um mecanismo de medidor de fluxo é suportado para permitir que o *OpenFlow* implemente várias operações simples de *QoS*, como limitação de taxa.

9.3 SDN para Redes Ópticas

A Figura 9.4 fornece uma visão de uma arquitetura SDN com seus drivers associados, virtualização de rede e uma interface de aplicativo para ditar o uso de rede dinâmica e flexível.

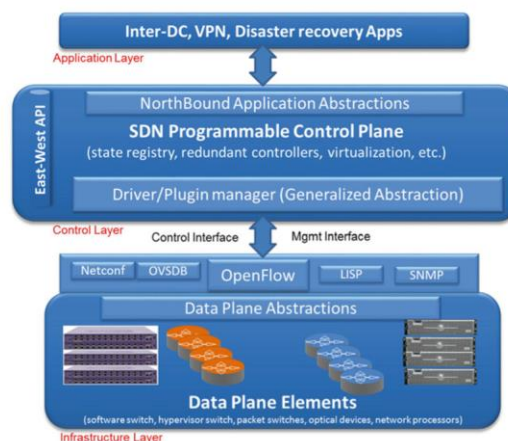


Fig. 9.4 Arquitetura SDN. Retirado de *Elastic Optical Networks* [2]

Abstração da rede de transporte

As características únicas da camada óptica, como, formato de modulação, capacidade, potência e restrições precisam ser consideradas no processo de abstração. Essa abstração deve ser adaptativa (em tempo real) e cognitiva (preditiva) para refletir as mudanças dinâmicas da camada física e monitora-las continuamente e assim caracterizar os parâmetros da camada física. Dependendo do tipo dos elementos de transmissão e rede óptica envolvidos e dos requisitos das operações da camada superior, diferentes níveis de abstração (a quantidade de informação a ser

exposta à camada superior) precisam ser definidos e os algoritmos de abstração correspondentes projetados e avaliados.

Um dos desafios é criar um modelo de camada óptica e descrevê-lo de uma maneira que seja simples o suficiente para a camada de controle superior utilizá-lo enquanto captura as propriedades do ruído não linear e canal óptico analógico.

Abstração de Fluxo

As abstrações do plano de controle de SDN suporta uma abstração de fluxo que se ajusta bem a diferentes tipos de redes (pacotes, ópticas) e fornece um paradigma comum para o controle. Ele é baseado em uma abstração de dados de tabelas de fluxo de comutação ou tabelas de conexão cruzada, manipuladas por uma API de comutação comum, como *OpenFlow* [45].

Esse mecanismo (*OpenFlow*) permite a generalização do conceito de comutação de fluxo para as tecnologias de transporte óptico, bem como sua integração com domínios de comutação de pacotes. O plano de controle que usa o controlador é capaz de abstrair a entidade de comutação e o formato de transporte de cada domínio tecnológico na forma de fluxos genéricos e de configurar elementos de rede usando tabelas especificadas de tecnologia. Por exemplo, em domínios de pacote, um fluxo pode ser qualquer combinação dos cabeçalhos L2-L4 e em uma rede óptica pode ser identificado por porta, slot de frequência, formato de modulação, etc.

Drivers

Um plano de controle programável precisa saber como configurar e operar uma variedade de dispositivos de hardware e elementos de rede, usando apenas abstrações de rede/nó. Os fornecedores de dispositivos de redes ópticas trazem suas próprias APIs e Sistema de Gerenciamento de Elemento/Rede que impedem a inovação. Técnicas, como definição de ontologia, mecanismos de mapeamento entre elementos de rede de diferentes fornecedores, modelagem de linguagem e adaptações semânticas e processamento, são apenas alguns exemplos das tentativas realizadas pela comunidade para superar as barreiras do fornecedor. O mais popular protocolo SDN é o *OpenFlow* (versão atual *OpenFlow* 1.4) que inclui o suporte de dispositivos ópticos.

Virtualização

A virtualização permite a criação de partições de rede logicamente isoladas sobre redes físicas abstraídas e as compartilha de maneira flexível e dinâmica. Mas as redes ópticas

tradicionais são fortemente integradas com a base física (por exemplo, comprimento de onda), dificultando o aproveitamento dos benefícios do conceito de virtualização no mesmo nível das redes *TDM (Time-division multiplexing)* tradicionais [46]. Com o advento das *EONs*, a virtualização sobre as novas tecnologias ópticas flexíveis desempenhará um papel importante na definição de serviços futuros. O data center SDN WAN do Google e o datacenter SDN interno da NTT já demonstraram o potencial dos recursos de WAN virtualizados, comprovando assim a necessidade de virtualização em redes ópticas [47].

Abstração da Camada de Aplicação Northbound

A aplicação *northbound* é importante para definir serviços e políticas baseados em aplicações, e também para integrar diferentes domínios administrativos e tecnológicos de redes baseadas em fibra óptica. Os dois aspectos principais a serem considerados na interface *northbound* são o conjunto de funcionalidades que são expostas a aplicações externas, e as diferentes interfaces que determinam os mecanismos que interagem com eles.

Essa aplicação é uma abstração de dados em um mapa comum de toda a rede manipulado por uma API. O mapa possui visibilidade das redes de comutadores de pacotes e circuitos, permitindo a criação de aplicações de rede que funcionam em várias camadas. A visibilidade total permite que as aplicações as funções e serviços de rede em várias camadas e tecnologias. A implementação de funções de rede como aplicações centralizadas é simples, já que a abstração de mapa comum oculta os detalhes da distribuição de estado (incluindo a API para múltiplos controladores) das aplicações, permitindo operação unificada em várias camadas.

Os grafos são usados para representar essa abstração, a qual ajuda o controle de rede óptica e a função de gerenciamento a utilizar os algoritmos de grafos que são amplamente utilizados no mundo óptico.

Desempenho

Além da virtualização de recursos de rede e da abstração de fluxos, a SDN tem o potencial de garantir soluções eficazes para engenharia de tráfego devido à sua visão centralizada dos recursos da rede. Além disso, a capacidade de configurar diretamente cada elemento de rede específico pode melhorar o controle de conexões ópticas, evitando a complexidade e limitações do protocolo de sinalização *GMPLS*, que abrange todos os atributos de rede em uma única mensagem. ao longo do circuito óptico.

Por outro lado, como qualquer arquitetura centralizada, a *SDN* pode sofrer com problemas de escalabilidade e confiabilidade. Os problemas de escalabilidade podem ser superados organizando a rede em vários domínios de visibilidade limitada e usando uma

arquitetura hierárquica de *PCEs*. Como desvantagem, a recuperação rápida após falha de rede é o maior desafio a ser resolvido. Diferentemente da arquitetura *GMPLS*, que permite que cada nó reaja à detecção de falhas, a tecnologia *SDN* precisa contar com restaurações pré planejadas e envolver o controlador centralizado, com riscos de escalabilidade e tempo de recuperação longo.

Capítulo 10 Conclusão

Neste trabalho foram abordados conceitos acerca das *Elastic Optical Networks*, que representam uma das propostas mais promissoras para a evolução iminente de redes ópticas convencionais pelo esgotamento progressivo do espectro disponível, devido à crescente demanda de tráfego de Internet

A *EON* prevê uma otimização da alocação de espectro, que é realizada implementando-se alocação de canal flexível, usando slots de frequência com tamanhos reduzidos. Por exemplo, a grade de frequências recomendada pelo setor de padronização de telecomunicações da União Internacional de Telecomunicações (ITU-T) passou da atual grade DWDM de 50GHz para uma flexível com granularidade de 12,5 GHz, a formalização das frequências centrais nominais com a granularidade de 6,25 GHz e o conceito de slots de frequência. Em tal esquema, uma conexão de plano de dados é comutada, com base em faixas de frequência alocadas e de tamanho variável, dentro do espectro óptico (canais).

Uma vez que a grade ITU tenha sido padronizada para uma arquitetura flexível, os transponders atuais e os Multiplexadores Ópticos Add-Drop Reconfiguráveis (ROADMs) seguirão o mesmo caminho. Neste contexto, o transponder óptico se moverá em direção a uma *Bandwidth Variable Transponders*, que é capaz de ajustar dinamicamente o espectro expandindo ou contraindo a largura de banda, de acordo com a demanda. Isso é possível variando o número de subportadoras, a taxa de símbolos e os formatos de modulação empregados, com base em uma negociação dinâmica entre distância e capacidade.

No entanto, quando os BVTs transmitem a baixas taxas de bits, uma parte de sua capacidade permanece sem uso. Assim, foi introduzido o conceito do *Sliceable Bandwidth Variable Transponder (S-BVT)*, que aumenta ainda mais o nível de elasticidade e eficiência dentro da rede. O *S-BVT* propõe uma nova maneira de fazer agrupamento óptico em *EON*, permitindo a transmissão de um ponto para vários destinos, alterando a taxa de tráfego para cada destino e o número de destinos sob demanda. Pode fornecer níveis ainda maiores de elasticidade e eficiência à rede, além da potencial economia. O custo total para a atualização da rede seria acessível, uma vez que apenas dois elementos de rede, o transponder e os nós ópticos, necessitam de atualização, que pode ser efetuada de maneira gradual.

Também foram abordados os principais conceitos de um plano de controle para redes de transporte óptico e o porquê um plano de controle é a chave para utilizar todo o potencial das *Elastic Optical Networks*. O plano de controle prevê automação de funcionalidades de redes ópticas, executando provisionamento e recuperação de conexões, engenharia de tráfego ou Quality of Service (*QoS*). Até a chegada de soluções de plano de controle baseadas em *SDN*, a maioria das implementações de planos de controle para redes principais e de transporte eram baseadas no conjunto de protocolos definidos pela arquitetura GMPLS.

As soluções do *SDN* para o transporte óptico em relação às do plano de controle existente, como o *GMPLS*, mostraram-se vantajosas. As arquiteturas baseadas em *SDN* simplificam as complexidades de lidar com o tráfego entre várias tecnologias de rede. Ele permite que a infraestrutura seja abstraída e usada por aplicações e serviços de rede como uma entidade virtual, permitindo que operadores de rede definam e manipulem mapas lógicos da rede, criando várias fatias de rede e que são independentes da tecnologia de transporte e dos protocolos de rede. A separação do plano de controle e do plano de dados faz do *SDN* um candidato adequado para um plano de controle integrado que suporta múltiplos domínios de rede e várias tecnologias de transporte. A arquitetura não só é adequada para resolver os problemas atuais de redes ópticas, cobrindo lacunas entre pacotes e camadas ópticas, mas também suportando novas operações como virtualização, sincronização entre camadas e largura de banda sob demanda.

Referências

1. V. López, L. Velasco (eds.), *Elastic Optical Networks*, Optical Networks,
2. (2018, Novembro 24) <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html>
3. ITU-T Rec. G.694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid
4. G. Shen, R.S. Tucker, Energy-minimized design for IP over WDM networks. *J. Opt. Commun. Netw.* 1(1), 176–186 (2009)
5. A. Nag, M. Tornatore, B. Mukherejee, Optical network design with mixed line rates and multiple modulation formats. *J. Lightwave Technol.* 28(4), 466–475 (2010)
6. G. Shen, R.S. Tucker, Sparse traffic grooming in translucent optical networks. *J. Lightwave Technol.* 27(20), 4471–4479 (2009)
7. M. Batayneh, D.A. Schupke, M. Hoffmann, A. Kirstaedter, B. Mukherjee, Optical network design for a multiline-rate carrier-grade Ethernet under transmission-range constraints. *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* 26(1), 121–130 (2008)
8. C. Meusburger, D.A. Schupke, A. Lord, Optimizing the migration of channels with higher bitrates. *J. Lightwave Technol.* 28, 608–615 (2010)
9. G. Charlet, Coherent detection associated with digital signal processing for fiber optics communication. *C. R. Phys.* 9, 1012–1030 (2008)
10. A. Bocoï et al., Reach-dependent capacity in optical networks enabled by OFDM, in *OFC'09*, San Diego, OMQ4, March 2009
11. A. Morea, G. Rizzelli, M. Tornatore, On the energy and cost trade-off of different energy-aware network design strategies, in *Proceedings of OFC/NFOEC 2013*, Paper OM3A.4, March 2013
12. B. Kozićki, H. Takara, Y. Tsukishima, T. Yoshimatsu, T. Kobayashi, K. Yonenaga, M. Jinno, Optical path aggregation for 1-Tb/s transmission in spectrum-sliced elastic optical path network. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 22(17), 1315–1317 (2010)
13. O. Pedrola, A. Castro, L. Velasco, M. Ruiz, J.P. Fernández-Palacios, D. Careglio, CAPEX study for multilayer IP/MPLS over flexgrid optical network. *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.* 4, 639–650 (2012)
14. O. Gerstel, C. Filsfi Is, T. Telkamp, M. Gunkel, M. Horneffer, V. Lopez, A. Mayoral, Multi-layer capacity planning for IP-optical networks. *IEEE Commun. Mag.* 52 (1), 44–51 (2014)
15. A. Land, A. Doig, An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica* 28, 497–520 (1960)
16. T.A. Feo, M. Resende, Greedy randomized adaptive search procedures. *J. Global Optim.* 6, 109–133 (1995)

17. J. Gonçalves, M. Resende, Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization. *J. Heuristics* 17, 487–525 (2011)
18. L. Velasco, P. Wright, A. Lord, G. Junyent, Saving CAPEX by extending flexgrid-based core optical networks towards the edges (Invited Paper). *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.* 5, A171–A183 (2013)
19. M.G. Taylor, Coherent detection method using DSP for demodulation of signal and subsequent equalization of propagation impairments. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 16 (2), 674–676 (2004)
20. T. Rahman et al., Record field demonstration of C-band multi-terabit 16QAM, 32QAM and 64QAM over 762 km of SSMF, in *Optoelectronics and Communications Conference, 2015*
21. M. Kuschnerov et al., DSP for coherent single-carrier receivers. *J. Lightwave Technol.* 27(16), 3614–3622 (2009)
22. M. Kuschnerov et al., Data-aided versus blind single-carrier coherent receivers. *IEEE Photon. J.* 2, 387–403 (2010)
23. A. Napoli et al., On the next generation bandwidth variable transponders for future flexible optical systems, in *2014 European Conference on Networks and Communications (EuCNC) (IEEE, 2014)*
24. T. Rahman et al., Long-haul terabit transmission (2272 km) employing digitally pre-distorted quad-carrier PM-16QAM super-channel, in *European Conference on Optical Communication, 2014*
25. J. Auge, can we use flexible transponders to reduce margins? in *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, 2013*
26. E. Ip, J.M. Kahn, Compensation of dispersion and nonlinear impairments using digital backpropagation. *J. Lightwave Technol.* 26 (20), 3416–3425 (2008)
27. D. Rafique et al., Intra super-channel fiber nonlinearity compensation in flex-grid optical networks. *Opt. Express* 21 (26), 32063–32070 (2013)
28. A. Napoli et al., Reduced complexity digital back-propagation methods for optical communication systems. *J. Lightwave Technol.* 32 (7), 1351–1362 (2014)
29. L.B. Du et al., Digital fiber nonlinearity compensation: toward 1-Tb/s transport. *IEEE Signal Process. Mag.* 31 (2), 46–56 (2014)
30. S. Poole, S. Frisken, M. Roelens, C. Cameron, Bandwidth-flexible ROADMs as network elements, in *OTuE1, OSA/OFC/NFOEC, 2011*
31. ITU-T Recommendation, Architecture of optical transport networks, Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks, Digital networks—Optical Transport Networks, October 2012
32. M. Jinno, H. Takara, Y. Sone, K. Yonenaga, A. Hirano, Multiflow optical transponder for efficient multilayer optical networking. *IEEE Commun. Mag.* 50(5), 56–65 (2012)

33. Draft revised G.694.1 version 1.3, Unpublished ITU-T Study Group 15, Question 6
10. P. Anandarajah, R. Zhou, R. Maher, M. Gutierrez Pascual, F. Smyth, V. Vujicic, L. Barry, Flexible optical comb source for super channel systems, in Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/ NFOEC), 2013, Anaheim, 2013
34. N. Sambo et al., Sliceable transponder architecture including multi-wavelength source. *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Networking* 6, 590–600 (2014)
35. IEEE. IEEE P802.3ba 40Gb/s and 100Gb/s Ethernet task force, official web site, June 2010
36. V. López, B. de la Cruz, O. González de Dios, O. Gerstel, N. Amaya, G. Zervas, D. Simeonidou, J.P. Fernandez-Palacios, Finding the target cost for sliceable bandwidth variable transponders. *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Networking* 6, 476–485 (2014)
37. FP7-STRONGEST project, Efficient and optimized network architecture: requirements and reference scenarios, <http://www.ict-strongest.eu>
38. E. Mannie (ed.), Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture, IETF RFC 3945 (2004, October)
39. D. Awduche, L. Berger, D. Gan, T. Li, V. Srinivasan, G. Swallow, RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels, IETF RFC 3209 (2001, December)
40. F. Zhang, X. Zhang, A. Farrel, O. Gonzalez de Dios, D. Ceccarelli, RSVP-TE Signaling Extensions in support of Flexi-grid DWDM networks, IETF draft-ietf-ccamp-flexible-grid-rsvp-te-ext (work in progress) November 2015
41. G. Bernstein, Y. Lee, D. Li, W. Imajuku, General Network Element Constraints Encoding for GMPLS Controlled Networks , IETF draft-ietf-ccamp-general-constraint-encode (work in progress)
42. S. Shenker, The Future of Networking, and the Past of Protocols. Open Networking Summit 2011, keynote speech (2011)
43. Open Networking Foundation, OpenFlow Switch Specification, version 1.4 (Wire protocol 0x5) (2013, October 14). <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onf-specifications/openflow/openflow-spec-v1.4.0.pdf>
44. Software-Defined Networking: The New Norm for Networks, ONF White Paper (2012, April 13). <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/sdn-library/whitepapers>. Accessed 14 Jun 2014
45. N. McKeown et al., OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM Commun. Rev.* 38 (2), 69–74 (2008). Accessed 02 Nov 2009
46. M. Jinno, H. Takara, K. Yonenaga, A. Hirano, Virtualization in optical networks from network level to hardware level [invited]. *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.* 5 (10), A46–A56 (2013). doi: 10.1364/JOCN.5.000A46

47. S. Jain, et al., B4: experience with a globally-deployed software defined WAN, in Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013, Hong Kong, (2013)