

UIARA CELINE DE MOURA

**ESTUDO DE MULTIPLEXADORES
ÓPTICOS *ADD-DROP*
RECONFIGURÁVEIS (ROADM)**

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

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em eletrônica

ORIENTADOR: Amílcar Careli César

São Carlos
2010

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M929e Moura, Uiara Celine de
Estudo de multiplexadores ópticos ADD-DROP
reconfiguráveis (ROADM) / Uiara Celine de Moura ;
orientador Amílcar Careli César -- São Carlos, 2010.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Redes ópticas reconfiguráveis. 2. ROADM. 3. WDM.
I. Título.

Sumário

Lista de Figuras	5
Lista de Siglas	7
Resumo	9
Abstract	10
1 Introdução.....	11
1.1 Tipos de Redes	13
1.1.1 Redes Locais (LAN – <i>Local-Area Networks</i>) e Redes de Acesso	13
1.1.2 Redes Metropolitanas (MAN - <i>Metropolitan-Area Networks</i>).....	14
1.1.3 Redes de Longa Distância (WAN - <i>Wide-Area Networks</i>).....	14
1.2 Topologia de Redes.....	14
1.3 Principais Componentes de uma Rede WDM.....	15
1.3.1 Transponder	15
1.3.2 Multiplexador/Demultiplexador Óptico	15
1.3.3 Amplificador Óptico.....	16
1.3.4 OADM, ROADM e OXC.....	16
2 ROADM	18
2.1 Evolução Tecnológica e de Arquitetura.....	18
2.1.1 Circuladores Ópticos	19
2.1.2 Demultiplexador - Chave - Multiplexador	20
2.1.3 Bloqueador de Comprimento de Onda	21
2.1.4 <i>Planar Lightwave Circuit</i> (PLC).....	23
2.1.5 Chave Seletora de Comprimento de Onda	25
2.1.6 <i>Arrayed Waveguide Grating</i> (AWG).....	29
2.2 Arquiteturas Baseadas em WSS.....	30
2.2.1 Arquitetura <i>Colored</i> (Portas dependentes do comprimento de onda) e <i>Directional</i> (Portas dependentes da direção)	30
2.2.2 Arquitetura <i>Colorless</i> (Portas independentes do comprimento de onda).....	31

2.2.3	Arquitetura <i>Colorless</i> e <i>Directionless</i> (Portas independentes da direção)	32
2.3	Aplicações	33
3	Conclusão.....	41
	Referências Bibliográficas	42

Lista de Figuras

Figura 1.1 Representação de um OADM unidirecional.	11
Figura 1.2 OXC utilizado para conectar redes em anéis.	12
Figura 1.3 Tipos de redes com alguns dispositivos, onde GbE é Gibabit Ethernet [4].	13
Figura 1.4 Exemplos de algumas topologias de redes: (a) linear, (b) barramento, (c) anel, (d) estrela e (e) malha.	14
Figura 1.5 Modelo funcional para OADM, ROADM e OXC NxN [8].	17
Figura 2.1 Evolução no tempo e algumas características das tecnologias e arquiteturas do ROADM [9].	18
Figura 2.2 Arquitetura de um ROADM com circulador óptico e rede de Bragg [6].	19
Figura 2.3 ROADM baseado na tecnologia <i>demux-switch-mux</i> (DSM) [2].	20
Figura 2.4 ROADM baseado no bloqueador de comprimento de onda (WB) [2] – [10].	21
Figura 2.5 Arquitetura de um bloqueador de comprimento de onda (WB) utilizando um demultiplexador e um multiplexador variável [11].	22
Figura 2.6 ROADM baseado em PLC , onde VOA é um amplificador óptico variável [13].	23
Figura 2.7 Chave óptica <i>add/drop</i> com MZI em tecnologia PLC [14].	24
Figura 2.8 Representação funcional de um WSS [15].	25
Figura 2.9 Ilustração de uma chave seletora de comprimento de onda (WSS) [16].	26
Figura 2.10 Exemplo de uma WSS baseada na tecnologia PLC [17].	26
Figura 2.11 Estrutura de chave óptica baseada em reflexão interna total [18].	27
Figura 2.12 Chave micro eletro-mecânica de duas dimensões [5].	28
Figura 2.13 Micrografia de uma MEMS com rotação livre de espelhos em 2-D [19].	28
Figura 2.14 chave micro eletro-mecânica de três dimensões [5].	29
Figura 2.15 AWG adaptado de [6].	30
Figura 2.16 Arquitetura para ROADM grau 3 sem <i>colorless</i> e <i>directionless</i> [20].	31
Figura 2.17 Arquitetura para ROADM grau 3 com <i>colorless</i> [20].	32
Figura 2.18 Arquitetura para ROADM grau 3 com <i>colorless</i> e <i>directionless</i> [20].	33
Figura 2.19 Evolução no transporte de dados em uma rede óptica [28].	35
Figura 2.20 Interfaces em uma rede com GMPLS/ASON [27].	36

Figura 2.21 Degradação da OSNR para dois valores de perda de inserção = 12 e 20 dB e dois valores de perda de enlace = 20 e 25 dB [22].	38
Figura 2.22 Degradação da OSNR para valores de PDL iguais a 0; 0,5 e 1 dB, perdas de enlace de 20 e 25 dB e com perda de inserção fixa de 12 dB [22].	39

Lista de Siglas

ASE	<i>Amplified spontaneous emission</i>
ASON	<i>Automatically switched optical network</i>
ATM	<i>Asynchronous transfer mode</i>
BER	<i>Bit error rate</i>
CC	<i>Connection controller</i>
CCI	<i>Connection controller interface</i>
DPQSK	<i>Differential quadrature phase shift keying</i>
DSM	<i>Demultiplexer-switch-multiplexer</i>
EDFA	<i>Erbium doped fiber amplifier</i>
FC	<i>Fibre channel</i>
FTTC	<i>Fiber-to-the-curb</i>
FTTH	<i>Fiber-to-the-home</i>
FTTO	<i>Fiber-to-the-office</i>
GMPLS	<i>Generalize multiprotocol label switch</i>
GPON	<i>Gigabit passive optical network</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IP	<i>Internet protocol</i>
IPTV	<i>Internet protocol television</i>
I-ROADM	<i>Intelligent reconfigurable optical add-drop multiplexer</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector</i>
MEMS	<i>Micro electro-mechanical switch</i>
MPLS	<i>Multiprotocol label switch</i>
NMS	<i>Network management system</i>
NNI	<i>Network-to-network interface</i>
OADM	<i>Optical add-drop multiplexer</i>
OSNR	<i>Optical signal-noise ratio</i>
OTN	<i>Optical transport network</i>
OXC	<i>Optical cross-connect</i>
PADM	<i>Packet add/drop multiplexer</i>
PDH	<i>Plesiochronous digital hierarchy</i>
PDL	<i>Polarization dependent loss</i>
PLC	<i>Planar lightwave circuit</i>
ROADM	<i>Reconfigurable optical add-drop multiplexer</i>
SDH	<i>Synchronous digital hierarchy</i>

SONET	<i>Synchronous optical networking</i>
TDM	<i>Time division multiplexer</i>
UNI	<i>User-to-network interface</i>
VOA	<i>Variable optical amplifier</i>
VoD	<i>Video on demand</i>
VoIP	<i>Voice over internet protocol</i>
WB	<i>Wavelength blocker</i>
WDM	<i>Wavelength division multiplexer</i>
WSS	<i>Wavelength selective switch</i>

Resumo

O grande aumento na demanda por serviços como IPTV (*internet protocol television*), VoD (*vídeo sob demanda*), VoIP (*voz sobre IP*) e internet banda larga, bem como serviços Ethernet nas empresas, vem aumentando o tráfego de dados nas redes ópticas de transporte. Os sistemas de comunicação óptica que utilizam multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM, *wavelength division multiplexing*) são a principal opção para transportar informações com altas taxas de transmissão em longas distâncias. Porém, em cada nó desta rede pode ser necessário adicionar/remover canais ou alterar rotas. Até pouco tempo, este processo era feito no domínio elétrico, mas o aumento no tráfego de dados exige que essa programação/alteração seja rápida e de preferência no domínio óptico. Os multiplexadores ópticos *add-drop* reconfiguráveis (ROADM – *reconfigurable optical add-drop multiplexer*) são uma alternativa viável para realizar esta tarefa de forma automática e, em alguns casos, remota. Neste trabalho, o ROADM será descrito em termos de sua evolução tecnológica. Serão apresentadas algumas arquiteturas baseadas no uso das chaves seletoras de comprimento de onda (WSS). Também será destacado seu papel nas redes ópticas reconfiguráveis, suas aplicações e benefícios, como transparência, flexibilidade e redução de mão de obra, bem como algumas penalidades causadas às redes ópticas, como perda de inserção, perda dependente de polarização, *in-band crosstalk* e estreitamento de largura de banda.

Palavras-chave: ROADM, WDM, redes ópticas reconfiguráveis.

Abstract

The large growing in demand for services like IPTV (Internet protocol television), VoD (video on demand), VoIP (voice over internet protocol) and broadband internet as well as companies Ethernet services, have caused increase in data traffic on optical transport networks. Optical communication systems that use wavelength division multiplexing (WDM) are the main option to transport high transmission rate information in long distances. However, at each node of this network, it might be necessary to add/drop channels or change routes. Until recently, this process has been done in electrical domain, but traffic data growing requires this program/modification to be fast and preferably in optical domain. Reconfigurable optical add-drop multiplexer (ROADM) are a viable alternative to perform this task in an automatic and, in some cases, remote form. In this work, ROADM will be described in terms of its technological evolution. It will be shown some architectures based on the use of wavelength selective switches (WSS). Also, it will be emphasized its function in reconfigurable optical networks, its application and benefits, such as transparency, flexibility and labor reduction, as well as some penalties caused for the optical networks, such as insertion loss, polarization dependent loss, in-band cross talk and passband narrowing.

Key words: ROADM, WDM, reconfigurable optical networks.

1 Introdução

Há alguns anos, houve a necessidade de se migrar de uma rede de hierarquia digital plesiócrons (PDH - *plesiochronous digital hierarchy*) para uma rede de hierarquia digital síncrona (SDH - *synchronous digital hierarchy*) em busca de flexibilidade em projeto e operação, bem como facilidade de monitoramento e administração [1].

Com o aumento na demanda ponto-a-ponto, o SDH passou a ser utilizado em conjunto com a tecnologia de multiplexação por comprimento de onda (WDM - *wavelength division multiplexing*), sendo possível transmitir vários canais SDH, cada um utilizando um comprimento de onda distinto, ao mesmo tempo e em uma única fibra óptica [2].

Para as redes ópticas de longa distância e banda larga, bem como para as redes metropolitanas e locais, a tecnologia WDM tem sido útil. Porém, ela só promove o meio para o transporte da informação entre dois pontos [3]. Neste tipo de sistema, uma demanda por comprimentos de onda não planejados só pode ser satisfeita com uma mudança na configuração/projeto da rede [1].

Para redes WDM em anel, ou mesmo ponto a ponto, com vários nós intermediários, uma funcionalidade passou a ser importante: a adição e remoção de comprimentos de onda em alguns nós para localidades ao longo do caminho físico da rede. O multiplexador óptico *add-drop*, ou OADM, ilustrado na Figura 1.1, começou a ser utilizado com esta finalidade. Porém, tais comprimentos de onda são fixos, isto é, cada OADM possui seu próprio conjunto de comprimentos de onda para serem adicionados/removidos no nó. Qualquer mudança nestes comprimentos, seja para aumentar ou para modificá-los, requer a substituição do equipamento.

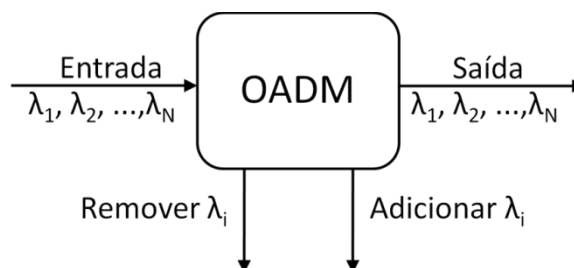


Figura 1.1 Representação de um OADM unidirecional.

Outra funcionalidade importante para redes WDM em malha é o desvio de caminho de alguns comprimentos de onda no nó, procurando seguir a melhor rota baseada em fatores como distância, qualidade, custo e confiabilidade de rotas específicas.

Para suprir estas necessidades, o OXC (*optical cross-connect*) começou a ser utilizado em redes WDM. Tais dispositivos promovem o roteamento do sinal no âmbito do comprimento de onda (domínio óptico), ou seja, um sinal WDM que entra em um nó OXC pode ter alguns dos seus comprimentos de onda seguindo uma direção diferente dos demais, conforme mostra a Figura 1.2. Nesta figura, o sinal do anel 1, composto pelos comprimentos de onda λ_1 , λ_2 e λ_3 , é roteado de tal forma que λ_1 continua no anel 1, λ_2 segue para o anel 2 e λ_3 para o anel 3. Roteamento análogo é feito para os sinais provenientes dos outros anéis.

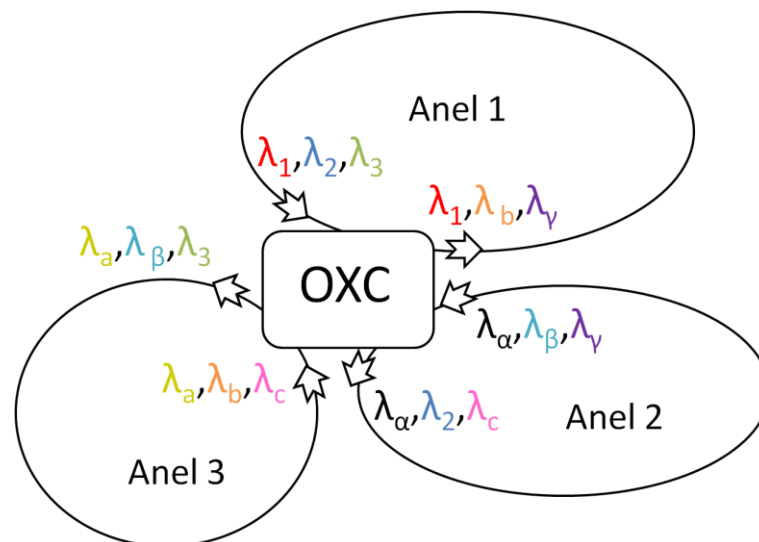


Figura 1.2 OXC utilizado para conectar redes em anéis.

Uma melhoria no OADM fixo resultou nos multiplexadores ópticos *add-drop* reconfiguráveis ou ROADM. Este tipo de dispositivo permite a reconfiguração dos canais a serem adicionados ou removidos, bem como dos canais de passagem no nó. Esta reconfiguração foi facilitada com o surgimento dos lasers sintonizáveis e das chaves totalmente ópticas.

Os primeiros ROADM possuíam grau 2, ou seja, dois pares de entrada e saída para cada direção. Dessa forma, analogamente ao OADM, estavam limitados a redes ponto-a-ponto ou em anel. Com o passar do tempo, surgiram os ROADM de graus 3, 4 e maiores (3, 4 ou mais pares entrada e saída), podendo assim suportar conexões entre redes em anel ou redes em malha, com as mesmas funções do OXC. Agora, os comprimentos de onda poderiam ser desviados para rotas específicas apenas no domínio óptico, além de serem adicionados ou removidos localmente, em um mesmo equipamento.

1.1 Tipos de Redes

A Figura 1.3 apresenta alguns tipos de redes que diferem de acordo com a distância, quantidade de informação transportada e taxa de bits.

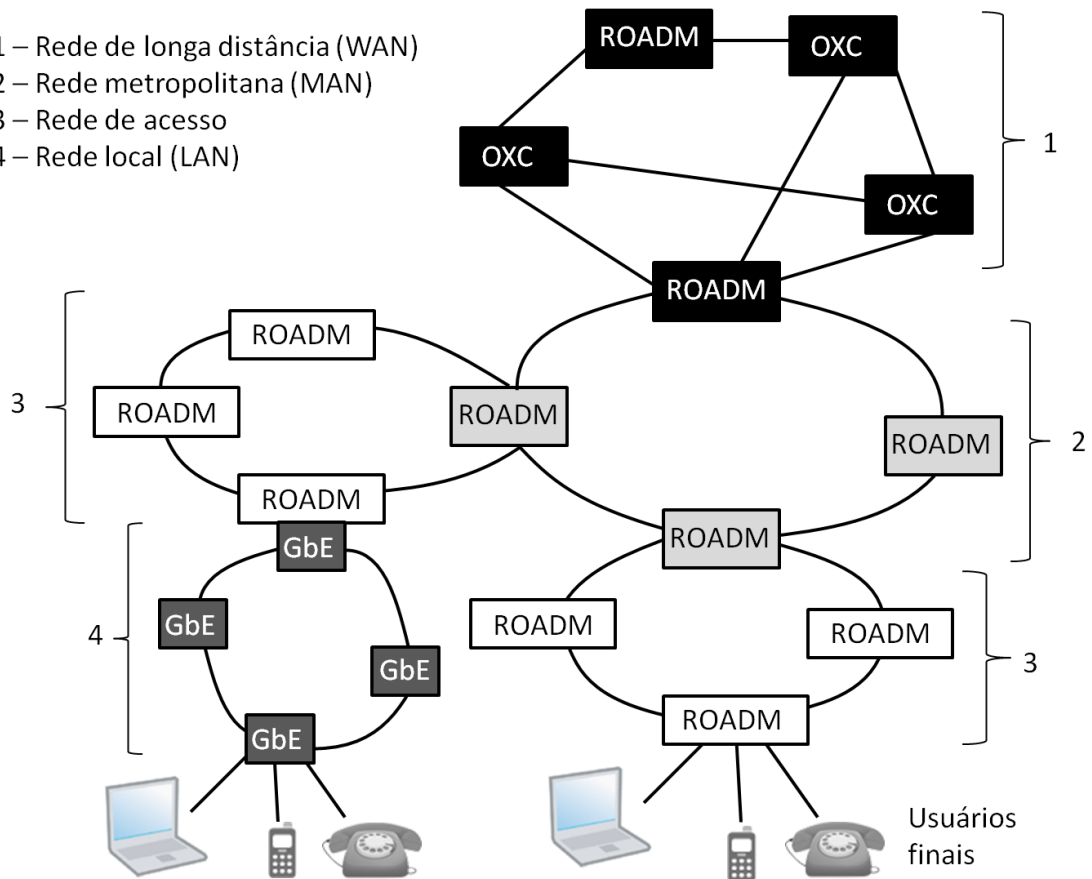


Figura 1.3 Tipos de redes com alguns dispositivos, onde GbE é Gibabit Ethernet¹ [4].

1.1.1 Redes Locais (LAN – Local-Area Networks) e Redes de Acesso

Redes locais reúnem vários usuários em uma pequena área (uma empresa, universidade ou até mesmo uma pequena cidade), normalmente com distâncias inferiores a 10 km e baixas taxas de transmissão [5]. As redes de acesso são as que provêem acesso aos usuários finais, que podem constituir uma LAN. Também chamada de “rede de *primeira milha*”, rede de acesso de assinante ou “*local loop*”, apresentam baixas taxas de transmissão. Porém, o crescente uso da internet tem promovido a introdução de redes de acesso com banda larga através de sistemas de fibras ópticas chamadas FTTO, *fiber-to-the-*

¹ Tecnologia utilizada para transmissão de quadros Ethernet em uma taxa de *giga bit* por segundo e padronizada pela IEEE 802.3 de 2008.

office (fibra até o escritório), FTTH, *fiber-to-the-home* (fibra até a casa) e FTTC, *fiber-to-the-curb* (fibra até a calçada) [6].

1.1.2 Redes Metropolitanas (MAN - *Metropolitan-Area Networks*)

São as redes dentro dos grandes centros urbanos, interligando as várias redes locais e de acesso com distâncias entre 10 e 100 km e estas com as redes de longa de distância. Apresentam taxa de transmissão superior às redes locais.

1.1.3 Redes de Longa Distância (WAN - *Wide-Area Networks*)

São as redes responsáveis por interligar os grandes centros urbanos, com mais de 1000 km e, por esse motivo, apresentam alta taxa de transmissão, que é alcançada por meio da tecnologia WDM. São compostas por cabos subterrâneos em rodovias ou cabos submarinos.

1.2 Topologia de Redes

As topologias de redes mais comuns estão ilustradas na Figura 1.4.

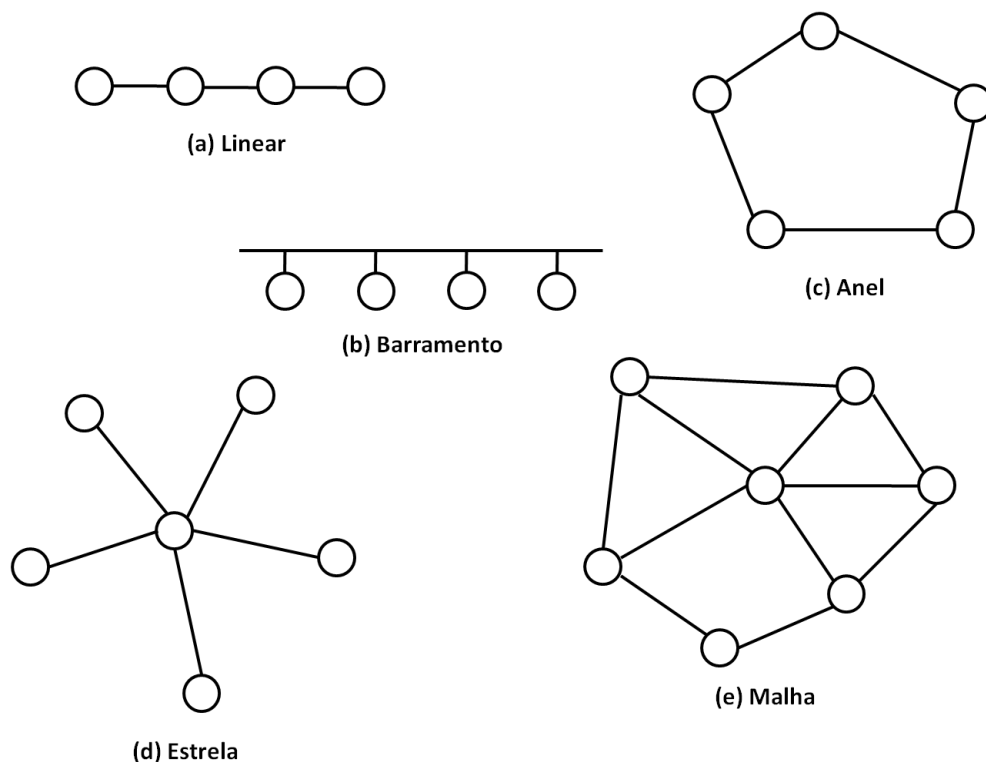


Figura 1.4 Exemplos de algumas topologias de redes: (a) linear, (b) barramento, (c) anel, (d) estrela e (e) malha.

As redes locais geralmente são do tipo linear, estrela ou anel. As redes metropolitanas geralmente são do tipo barramento ou anel. Já as redes de longa distância são do tipo linear, anel ou malha.

1.3 Principais Componentes de uma Rede WDM

1.3.1 Transponder

Um transponder é uma combinação de transmissor e receptor que possui uma interface óptica de curto alcance no lado cliente, geralmente modulando uma portadora óptica de comprimento de onda de 850 nm ou 1310 nm em uma rede de curta distância (redes metropolitanas ou de acesso), e outra interface compatível com sinal WDM no lado rede, dentro das bandas S (1460 a 1530 nm), C (1530 a 1560 nm) ou L (1560 a 1630)² padronizadas pelo ITU-T³ (Grade ITU-T) para redes de longas distâncias.

Estes dispositivos são responsáveis por converter o sinal óptico na entrada cliente em um sinal óptico na saída com comprimento de onda dentro da grade ITU-T. Dessa forma, cada sinal cliente possui um novo comprimento de onda específico dentro do sistema WDM. O processo realizado pelo transponder, de converter o comprimento de onda do sinal, é conhecido por “*colorir o sinal*”.

Na outra ponta do sistema, outro transponder é necessário para fazer a conversão inversa: de um comprimento de onda na banda S, C ou L da grade ITU-T para um comprimento de onda específico do sinal cliente (850 ou 1310, por exemplo).

Além de converter o sinal em comprimento de onda, o transponder também é responsável por encapsular o sinal que vem do lado cliente no padrão SONET/SDH (*synchronous optical networking / synchronous digital hierarchy*), PDH (*plesiochronous digital hierarchy*), FC (*fibre channel*), dentre outros, em um padrão OTN, *optical transport network*, estrutura de quadros padronizada pelo ITU-T para transmissão em sistemas WDM.

1.3.2 Multiplexador/Demultiplexador Óptico

Depois de cada sinal cliente ter seu comprimento de onda convertido pelo transponder, estes sinais são inseridos em uma única fibra óptica. Esse processo é feito

² Banda S = Short wevelength; Banda C = Conventional; Banda L = Long wevelength

³ ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*): responsável pela padronização internacional de telecomunicações.

pelo multiplexador, que possui um número de entradas correspondente aos canais na entrada e uma única saída para a fibra óptica.

Já o demultiplexador faz o oposto do multiplexador, separando todos os comprimentos de onda em cada uma de suas saídas, que são interligadas aos respectivos transponders.

Porém, estes equipamentos são recíprocos, isto é, um multiplexador pode ser utilizado como um demultiplexador e vice-versa, bastando inverter saída(s) e entrada(s), pois estes dispositivos são idênticos internamente.

1.3.3 Amplificador Óptico

As fibras ópticas utilizadas para transportar o sinal WDM apresentam atenuação, especificada em dB/km. Com a finalidade de compensar tal perda, é necessária a inserção de amplificadores ópticos ao longo da rede. Estes amplificadores ópticos, introduzidos ao longo do enlace óptico, são chamados de amplificadores de linha.

Pode-se fazer necessário amplificar o sinal antes dele entrar na fibra óptica. Esta amplificação é feita por meio de um tipo de amplificador chamado *booster*, que amplifica o sinal a níveis de potências adequados para a transmissão óptica.

Na recepção podem-se utilizar dois tipos de amplificadores. Um que amplifica diretamente o sinal proveniente da fibra óptica, geralmente que utiliza o efeito Raman, e um pré-amplificador, colocado logo após o amplificador Raman.

Os amplificadores ópticos construídos com fibras dopadas com érbio são chamados de EDFA (*erbium dopped fiber amplifier*). Os amplificadores que utilizam esta tecnologia são os amplificadores de linha, o *booster* e o pré-amplificador.

1.3.4 OADM, ROADM e OXC

Estes equipamentos podem ser encontrados nos nós da rede e realizam a comutação de um comprimento de onda contido em uma das entradas para qualquer uma das saídas, como pode ser visto na Figura 1.5. Nesta figura, os N demultiplexadores são utilizados para separar os M comprimentos de onda do sinal WDM em cada entrada, enquanto os multiplexadores reúnem os comprimentos escolhidos para cada uma das N saídas. A matriz de comutação irá relacionar comprimento de onda e saída.

No OADM, esta matriz é estática e, além das N entradas e saídas, há também entradas e saídas para adição e remoção de canais fixos localmente. Assim, não é possível qualquer mudança.

O ROADM é análogo ao OADM, mas sua matriz de comutação pode ser reconfigurada. Esta reconfiguração pode ser feita remotamente ou não, dependendo da tecnologia utilizada.

Já o OXC também apresenta uma matriz reconfigurável, mas sem a entrada e saída adicionais para a adição e remoção de canais locais. Pode ser opaco, baseado na tecnologia de chaveamento elétrico, com conversão O-E-O, proporcionando regeneração e conversão de comprimento de onda, mas demanda alto custo e não é transparente em relação à taxa de bits e ao protocolo utilizado [7]. E pode ser transparente, sem conversão O-E-O, apresentando transparência em relação à taxa de bits, ao formato de modulação do sinal, ao protocolo utilizado, etc [6].

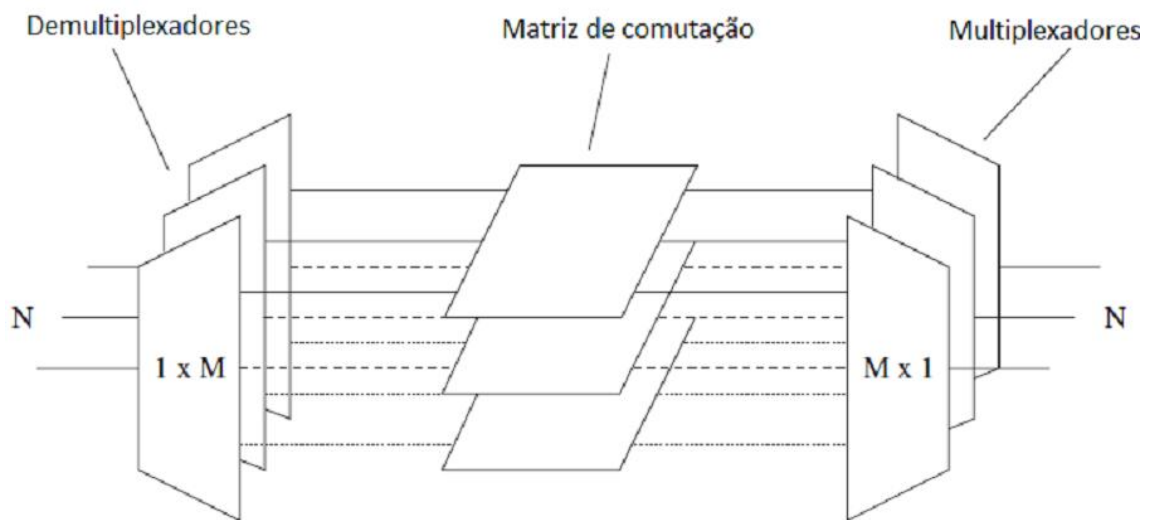


Figura 1.5 Modelo funcional para OADM, ROADM e OXC NxN [8].

2 ROADM

O ROADM, como já mencionado, é um dispositivo da rede WDM que proporciona uma maior flexibilidade, realizando a comutação de canais (comprimentos de onda) de qualquer entrada para qualquer saída, sendo ainda possível adicionar e remover canais localmente no nó.

Pode ser de grau 2, grau 3, e assim por diante, dependendo do número de enlaces de entrada e saída. Assim, podem ser utilizados em qualquer topologia de rede. Encontra uma aplicação mais eficaz em redes em malha, devido à capacidade de roteamento realizado totalmente no domínio óptico em redes ópticas de transporte com plano de controle GMPLS (*Generalized multiprotocol label switch*).

2.1 Evolução Tecnológica e de Arquitetura

A Figura 2.1 apresenta a evolução tecnológica dos dispositivos *add/drop* ao longo do tempo, com início em aproximadamente 1998, quando OADM e OXC necessitavam de conversão O-E-O. Posteriormente surgiram os ROADMs que utilizavam circuladores ópticos para sua implementação, seguido pelas tecnologias DSM (*demux-switch-mux*), WB (*wavelength blocker* - bloqueador de comprimento de onda), PLC (*planar lightwave circuit* - circuito planar de onda de luz), WSS (*wavelength selective switch* - chave seletora de comprimento de onda), I-ROADM (ROADM inteligente), PADM (*packet add/drop multiplexer* - multiplexador add/drop de pacotes).

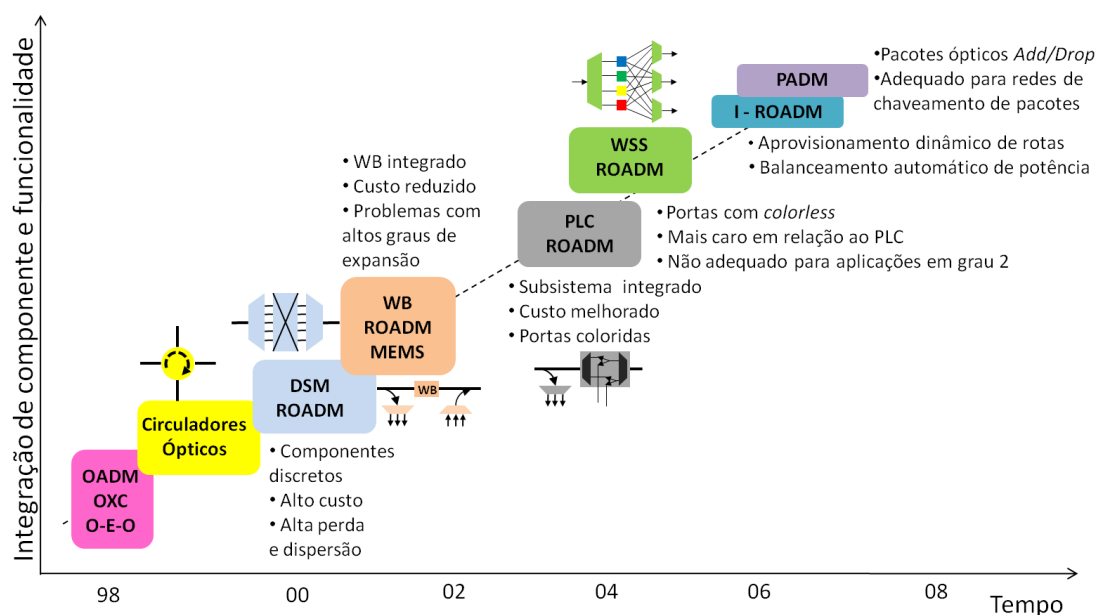


Figura 2.1 Evolução no tempo e algumas características das tecnologias e arquiteturas do ROADM [9].

2.1.1 Circuladores Ópticos

Um ROADM pode ser construído por meio de circuladores ópticos em conjunto com uma rede de Bragg sintonizável, conforme mostra a Figura 2.2 adaptada da referência [6].

A Figura 2.2 mostra um sinal óptico composto por quatro comprimentos de onda que entra na porta 1 do circulador óptico. Este dispositivo funciona de forma que o sinal que entra na porta 1 sai na porta 2 e o sinal que entra na porta 2 sai na porta 3, e assim por diante, seguindo uma única direção, como indicado na figura. Dessa forma, os quatro comprimentos de onda saem pela porta 2 e seguem para a rede de Bragg. Esta rede funciona como um filtro, que permite a passagem dos comprimentos de onda λ_1 , λ_3 e λ_4 e reflete o comprimento λ_2 . Este comprimento de onda volta para o circulador, entrando pela porta 2 e saindo pela porta 3, onde é retirado do dispositivo (porta *DROP*). Na saída da rede de Bragg existe outro circulador, onde o comprimento de onda λ_2 é adicionado (porta *ADD*) na porta 3 e sai pela porta 1, seguindo para rede de Bragg, onde também é refletido, se reunindo aos demais comprimentos de onda, que entram pela porta 1 do circulador e saem pela porta 2. Assim, na saída do dispositivo, tem-se novamente todos os comprimentos de onda, sendo que o comprimento λ_2 foi adicionado localmente.

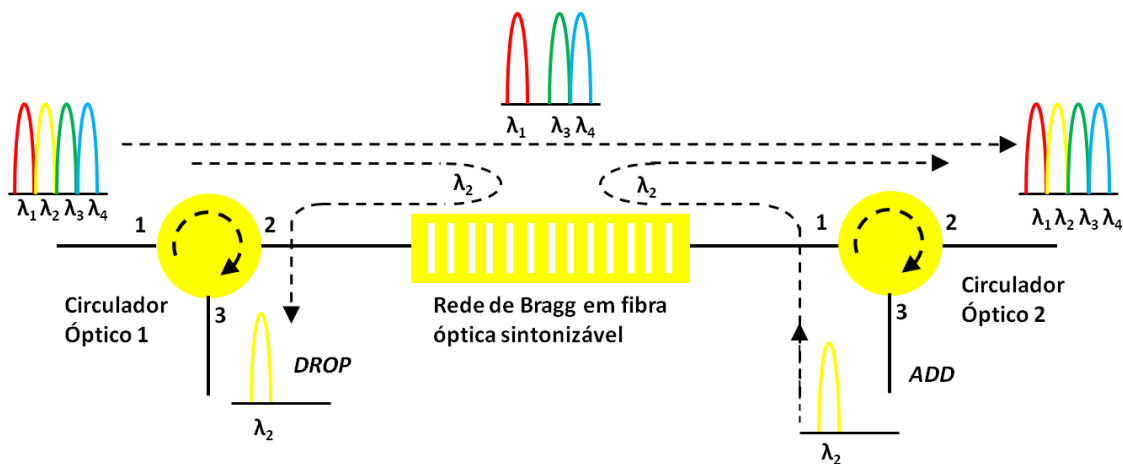


Figura 2.2 Arquitetura de um ROADM com circulador óptico e rede de Bragg [6].

A rede de Bragg pode ser sintonizada para qualquer comprimento de onda. Por esse motivo, este tipo de tecnologia é utilizado em ROADM baseados em ajuste (*tunning-based ROADM architecture*). Esta independência em relação ao comprimento de onda nas portas *add/drop* é denominada *colorless* (sem cor).

Um problema que este tipo de tecnologia apresenta é o bloqueio de comprimentos de onda. Este bloqueio ocorre porque o processo de sintonia de comprimento de onda é contínuo. Dessa forma, quando a rede de Bragg está bloqueando um comprimento de onda

e é ajustado para bloquear outro comprimento, ele obrigatoriamente bloqueará todos os comprimentos existentes entre os dois por um momento [6]. Se algum destes comprimentos intermediários estiver em funcionamento, o serviço prestado por ele será interrompido durante a sintonia.

Uma das formas de prevenir este tipo de bloqueio é fazer com que os possíveis comprimentos de onda que serão retirados do nó estejam em sequência, sem que se passe por um comprimento de onda de passagem durante a sintonia dos canais *add/drop*.

Outra limitação desta tecnologia é que o número de comprimentos de onda *add/drop* simultâneos corresponde ao número de estruturas em série. Assim, o acesso local a um número elevado de canais corresponde a um elevado número de estruturas em série.

2.1.2 Demultiplexador - Chave - Multiplexador

O ROADM baseado na arquitetura demux-chave-mux (*demux-switch-mux* – DSM) está ilustrado na Figura 2.3, onde todos os comprimentos de onda do sinal WDM na entrada devem ser demultiplexados. Para cada canal, uma chave óptica (*switch*) é utilizada para selecionar se o canal seguirá para o multiplexador ou será retirado localmente, bem como para adicionar canais locais [2].

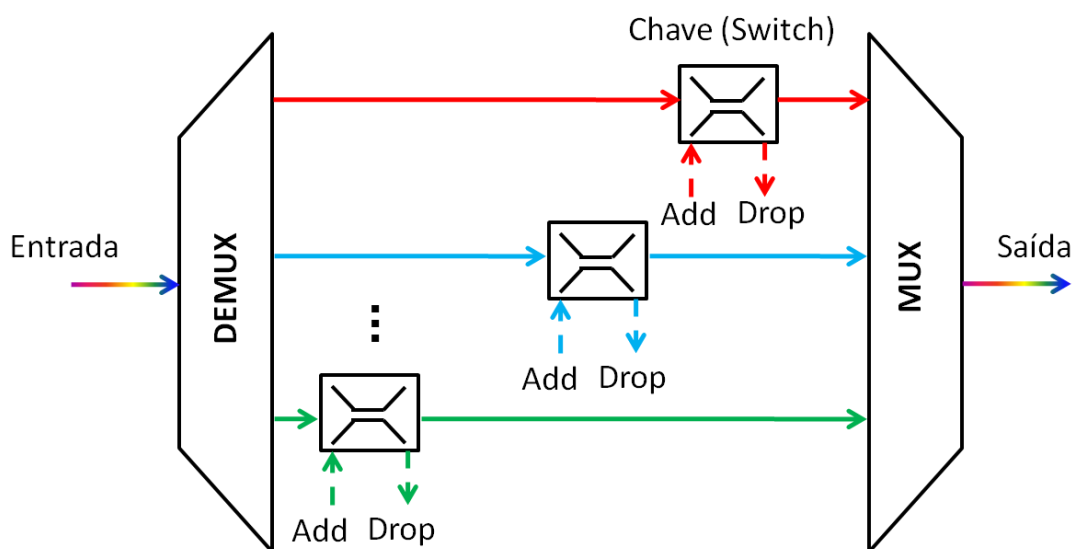


Figura 2.3 ROADM baseado na tecnologia *demux-switch-mux* (DSM) [2].

Todos os canais necessitam ser amplificados e cada canal adicionado/retirado deve ser conectado à porta específica do equipamento. Esta característica de dependência em relação ao comprimento de onda leva a denominação de *colored* (colorida). Além disso, apresenta alta perda e perda dependente da polarização [2].

2.1.3 Bloqueador de Comprimento de Onda

O ROADM baseado em bloqueador de comprimento de onda (*wavelength blocker – WB*) foi o primeiro a ser disponibilizado comercialmente [10]. Seu esquema está apresentado na Figura 2.4. Uma parte do sinal WDM que chega é selecionada através de um conjunto de filtros na saída de um *splitter*. Estes sinais seguem para os seus respectivos transponders, onde serão retirados localmente.

A outra parte do sinal WDM chega ao bloqueador, que bloqueia os canais que foram retirados. Em seguida, estes canais são adicionados através de um combinador.

Os ROADMs que utilizam esta tecnologia são geralmente *colored*, isto é, cada porta *add/drop* é fixa em comprimento de onda, mas podem se tornar *colorless* (onde a porta *add/drop* independe do comprimento de onda) com a adição de filtros ajustáveis nas portas de retirada de canais e lasers ajustáveis nas portas de adição de canais. Entretanto, esta mudança tem um alto custo [10].

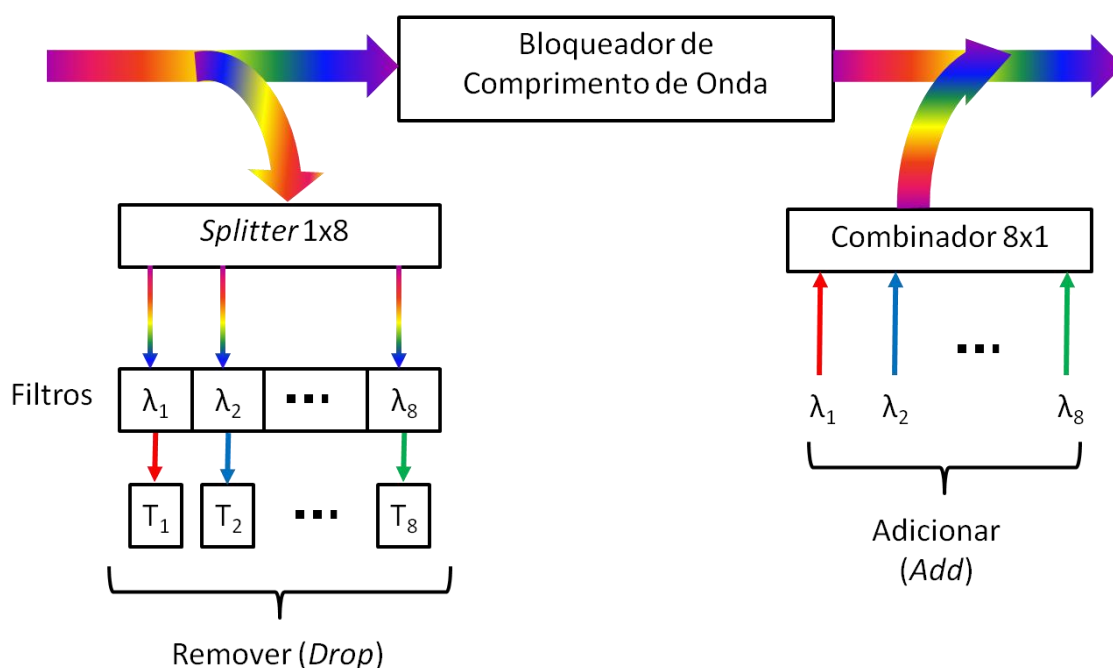


Figura 2.4 ROADM baseado no bloqueador de comprimento de onda (WB) [2] – [10].

Uma forma de construir um bloqueador de comprimento de onda é utilizando um multiplexador e um demultiplexador, como mostrado na Figura 2.5.

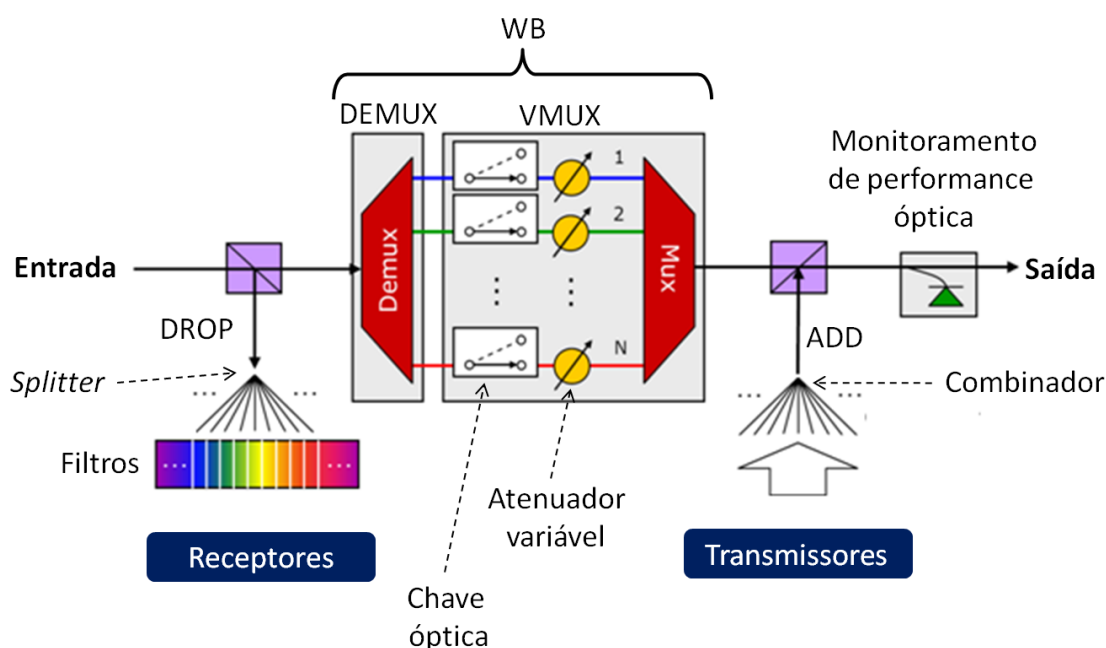


Figura 2.5 Arquitetura de um bloqueador de comprimento de onda (WB) utilizando um demultiplexador e um multiplexador variável [11].

Na Figura 2.5, VMUX é um multiplexador variável, que bloqueia os comprimentos de onda que foram retirados pela saída DROP de acordo com as posições das chaves ópticas e ainda promove uma equalização de potência por meio dos atenuadores variáveis.

Uma das vantagens deste tipo de ROADM é que 100% dos canais podem ser retirados ou inseridos localmente. Assim, é possível acessar todos os comprimentos de onda. Porém, existem algumas desvantagens. A adição de novas ramificações no nó se torna muito cara e complexa, sendo necessário o re-projeto do site e, eventualmente, a interrupção do tráfego. Além disso, o ROADM baseado neste tipo de tecnologia requer um conjunto de equipamentos muito grande, tornando o cabeamento entre componentes mais complexo [12].

Dessa forma, uma rede com este tipo de ROADM não apresenta flexibilidade para atender a mudanças na demanda de tráfego e expansão de serviços e, por isso, tem perdido espaço para novas tecnologias.

2.1.4 Planar Lightwave Circuit (PLC)

A Figura 2.6 apresenta um ROADM baseado na tecnologia *Planar Lightwave Circuit* com um demultiplexador monitorado para os canais retirados (*DROP*) seguido por um módulo adicionador reconfigurável (*ADD*) [13].

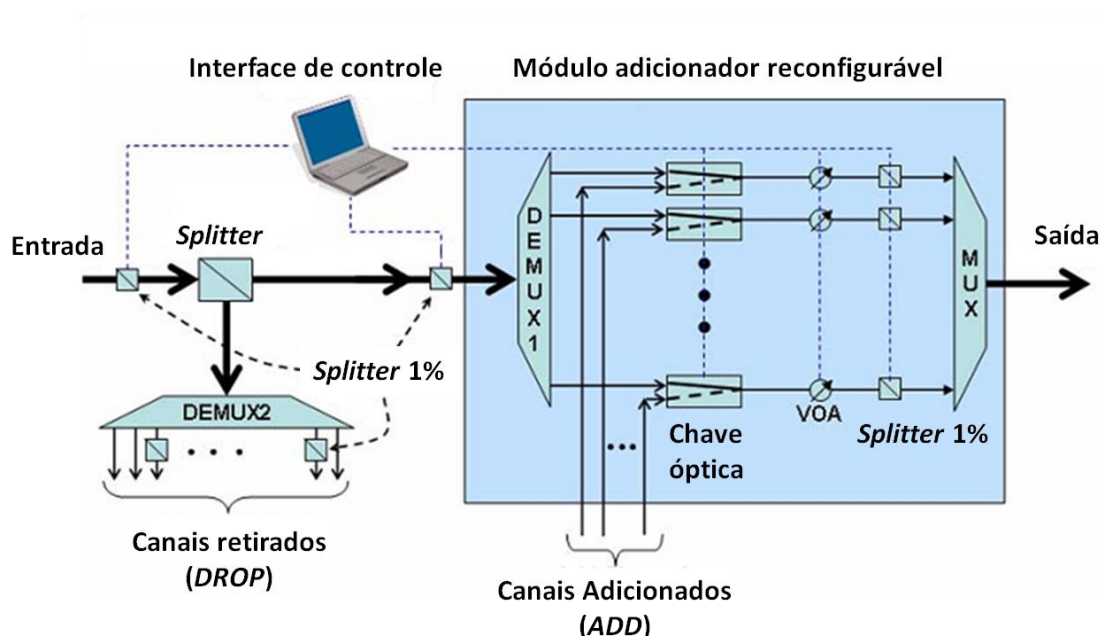


Figura 2.6 ROADM baseado em PLC, onde VOA é um amplificador óptico variável [13].

Na Figura 2.6, parte do sinal na entrada do ROADM segue para o demultiplexador (DEMUX2), onde podem ser retirados, e outra parte segue para o módulo adicionador reconfigurável. Neste módulo, o sinal é demultiplexado e as chaves ópticas selecionam qual sinal seguirá para linha de saída: o sinal de passagem ou o canal adicionado localmente.

As chaves ópticas baseadas na tecnologia PLC utilizam os efeitos termo-ópticos da sílica [14], de forma que os ROADMs baseados nesta tecnologia são construídos a partir de guias de onda de sílica (SiO_2) sobre silício (Si) [13].

Outra forma de construir um ROADM a partir de tal tecnologia e com a utilização de apenas um demultiplexador é por meio da chave óptica ilustrada na Figura 2.7. Cada chave é composta por quatro interferômetros Mach-Zehnder (MZI) construídos a partir da tecnologia PLC. Um sinal na entrada superior do MZI é dividido igualmente para os dois caminhos através do acoplador 3 dB. Se o caminho superior é aquecido a ponto de provocar um aumento de meio comprimento de onda, um dos sinais apresentará defasagem de meio comprimento de onda em relação ao outro e nas saídas do acoplador haverá interferência destrutiva (saída superior) e construtiva (saída inferior). O oposto ocorre se o sinal for

aplicado à entrada inferior do MZI. Assim, quando os MZI#2 e MZI#3 são aquecidos, não haverá sinal na saída superior do MZI#2 devido à interferência destrutiva, enquanto na sua saída inferior haverá sinal devido à interferência construtiva. Este sinal segue para o MZI#3, onde é recuperado na saída inferior. O sinal segue para a saída através do MZI#4, que não apresenta interferência, pois não está aquecido. Dessa forma, todo sinal na entrada passa para a saída e o dispositivo está no modo “passagem”. Por outro lado, quando os MZI#1 e MZI#4 são aquecidos, observa-se que o sinal de entrada *add* vai para a saída e a entrada vai para a saída *drop*, e o dispositivo fica no modo “*add/drop*”. Dessa forma, tem-se um ROADM com arquitetura DSM (*demux-switch-mux*) onde as chaves são baseadas na tecnologia PLC.

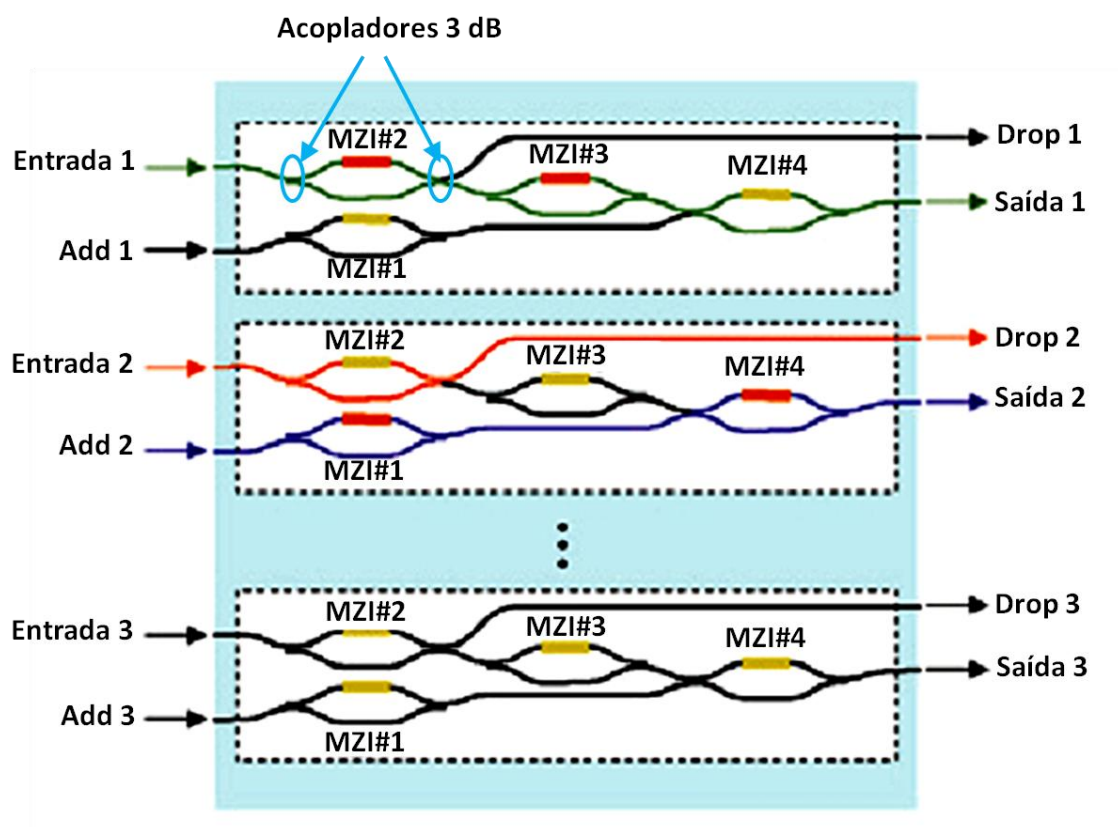


Figura 2.7 Chave óptica *add/drop* com MZI em tecnologia PLC [14].

Com esta tecnologia, as portas são fixas em comprimento de onda (*colored*). Por este motivo, os ROADMs baseados em chave seletora de comprimento de onda começaram a ser introduzidos [9].

2.1.5 Chave Seletora de Comprimento de Onda

A chave seletora de comprimento de onda (*wavelength selective switch* - WSS) consiste em uma estrutura 1xN (uma entrada e N saídas) ou Nx1 (N entradas e uma saída) composta por multiplexadores e demultiplexadores, conforme pode ser visto na Figura 2.8, onde a matriz de comutação é formada por chaves ópticas seletoras.

Assim, para um WSS como na Figura 2.8 tem-se uma entrada na qual um sinal composto de vários comprimentos de onda é inserido. Ao passar pelo demultiplexador, estes comprimentos de onda são separados e pode seguir para qualquer um dos multiplexadores na saída, conforme a posição da chave óptica.

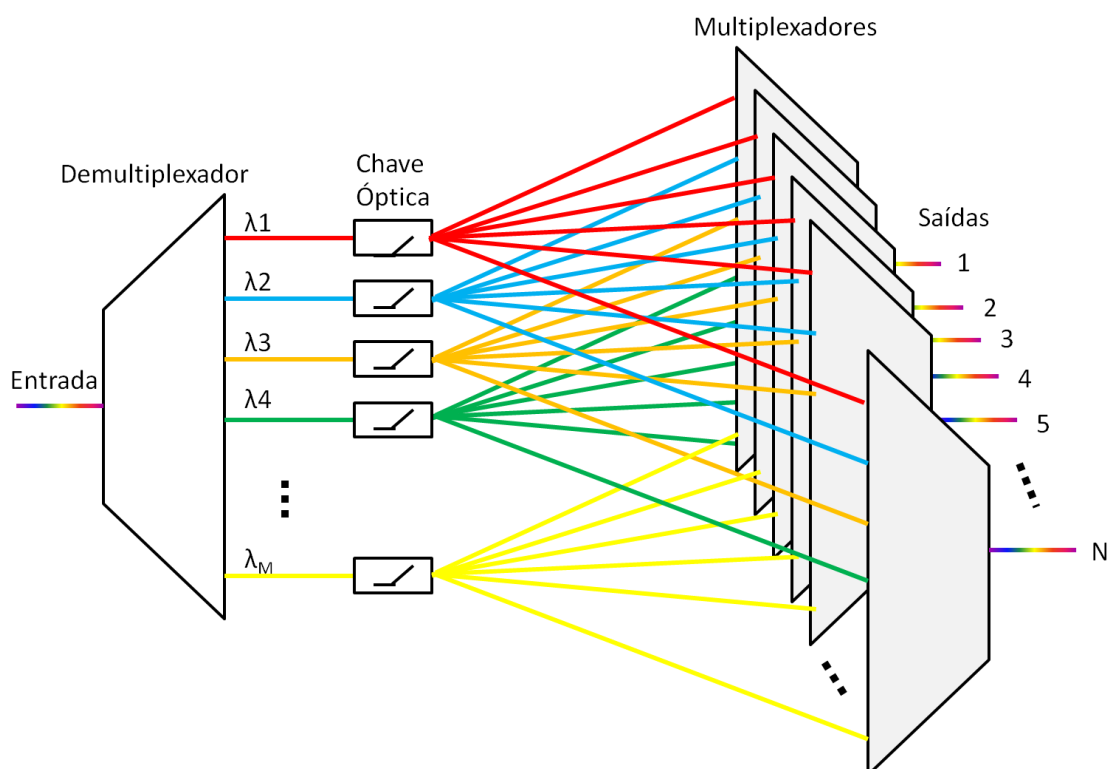


Figura 2.8 Representação funcional de um WSS [15].

Considerando este dispositivo uma caixa preta, os comprimentos de onda na saída podem fazer parte de qualquer combinação dos comprimentos de onda na entrada, conforme mostra a Figura 2.9.

O dispositivo-chave do WSS é a chave óptica utilizada para selecionar o multiplexador de saída para o qual o comprimento de onda irá seguir. Esta seleção pode ser feita remotamente para algumas arquiteturas.

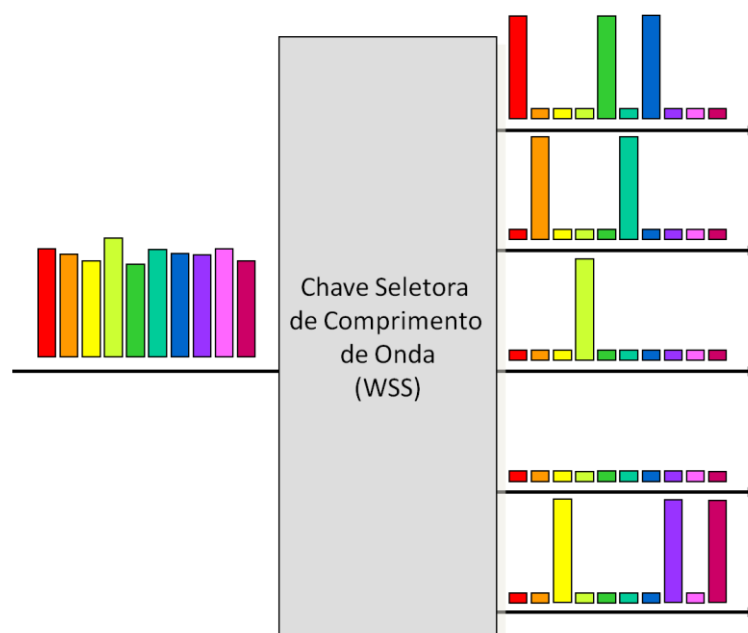


Figura 2.9 Ilustração de uma chave seletora de comprimento de onda (WSS) [16].

Dentre as tecnologias utilizadas para a construção das chaves ópticas seletoras estão as chaves de cristal líquido (*liquid crystal switch*) e as chaves micro eletro-mecânicas (*micro electro-mechanical switch* - MEMS). Ambas serão descritas a seguir. A tecnologia PLC também pode ser utilizada para construção de uma WSS [17], conforme ilustrado na Figura 2.10.

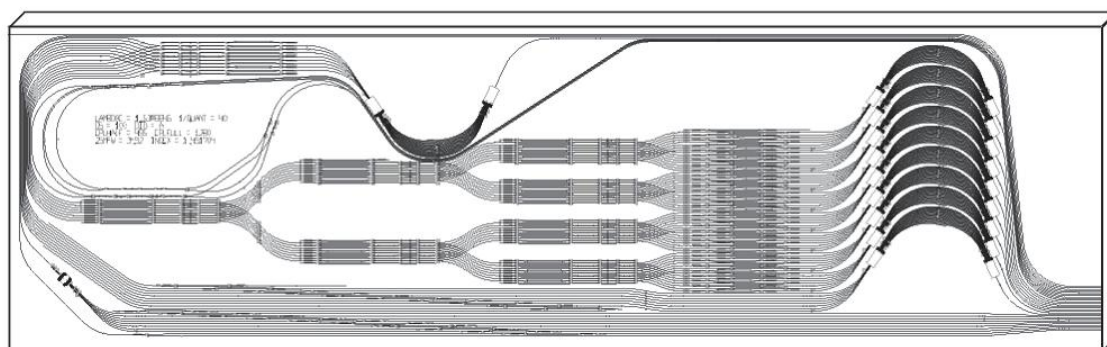


Figura 2.10 Exemplo de uma WSS baseada na tecnologia PLC [17].

2.1.5.1 Chave de Cristal Líquido

O princípio básico de funcionamento da chave de cristal líquido é o controle do índice de refração do guia de onda na intersecção de uma chave óptica baseada em dois guias de onda cruzados [18]. O cristal líquido é inserido nesta intersecção e seu índice de refração é ajustado pelo controle da orientação das moléculas por meio da variação de campo elétrico externo.

Um esquema de chave de cristal líquido pode ser visto na Figura 2.11, onde n_C é o índice de refração do guia de onda e n_{LC} é o índice de refração do cristal líquido. Quando um sinal chega (em amarelo) pela porta A e incide na interface F, ele poderá sofrer reflexão total ou não, dependendo do valor de n_{LC} , dado que o ângulo de incidência θ é fixo. Para reflexão total, $n_{LC} < n_C \sin(\theta)$, o sinal (em vermelho) segue pela porta C. Para $n_C = n_{LC}$, o sinal (em verde) continua no mesmo sentido, saindo pela porta D.

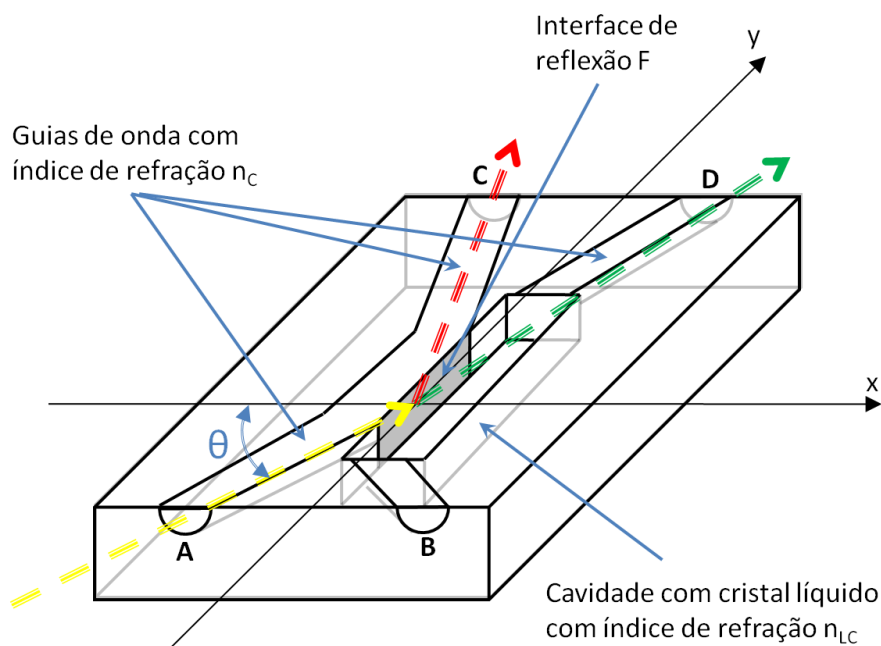


Figura 2.11 Estrutura de chave óptica baseada em reflexão interna total [18].

2.1.5.2 Chaves Micro Eletro-Mecânicas

Outra forma de construir chaves ópticas é por meio da tecnologia micro-eleto-mecânica (*Micro Electro-Mechanical Switch* – MEMS). Esta tecnologia consiste na fabricação de espelhos microscópicos, que são utilizados para desviar o sinal óptico para a direção desejada. Estes espelhos são rotacionados por meio da aplicação de um sinal elétrico. As chaves MEM são divididas em duas categorias ou configurações: bidimensional e tridimensional, dependendo da geometria utilizada para conectar as fibras de entrada e saída [5].

A Figura 2.12 mostra o caso bidimensional, onde uma matriz de espelhos conecta as fibras de entrada e saída. Um sinal que entra em uma determinada fibra pode seguir para qualquer fibra de saída, bastando que o espelho localizado na interseção entre as duas fibras rotacione de forma que a reflexão correta do sinal ocorra. De acordo com [5], o tempo de chaveamento é em torno de 5 ms, um tempo considerado alto, e a perda de inserção

depende das dimensões da matriz, sendo de aproximadamente 3 dB para uma matriz de 16 x 16 espelhos e 2 cm x 2 cm de área.

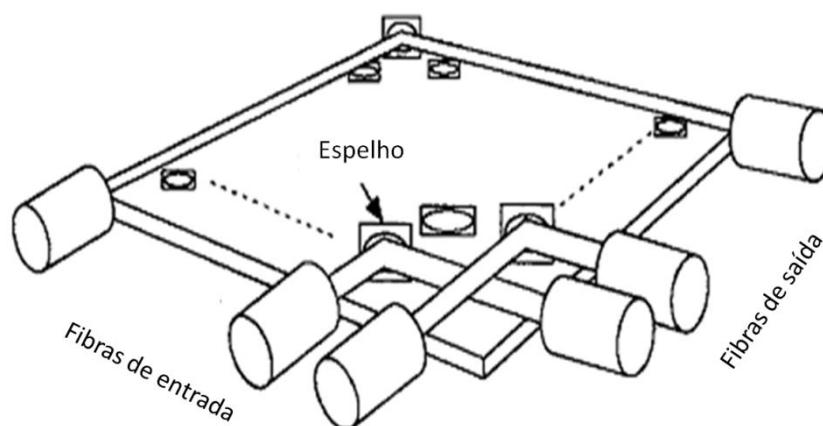


Figura 2.12 Chave micro eletro-mecânica de duas dimensões [5].

Um inconveniente dessa configuração é que para N entradas e N saídas, são necessários N^2 espelhos. Por este motivo, este tipo de configuração não é utilizado para um número um valor de N muito alto.

A Figura 2.13 apresenta uma micrografia de uma chave óptica MEMS 8×8 baseada na livre-rotação de micro espelhos.

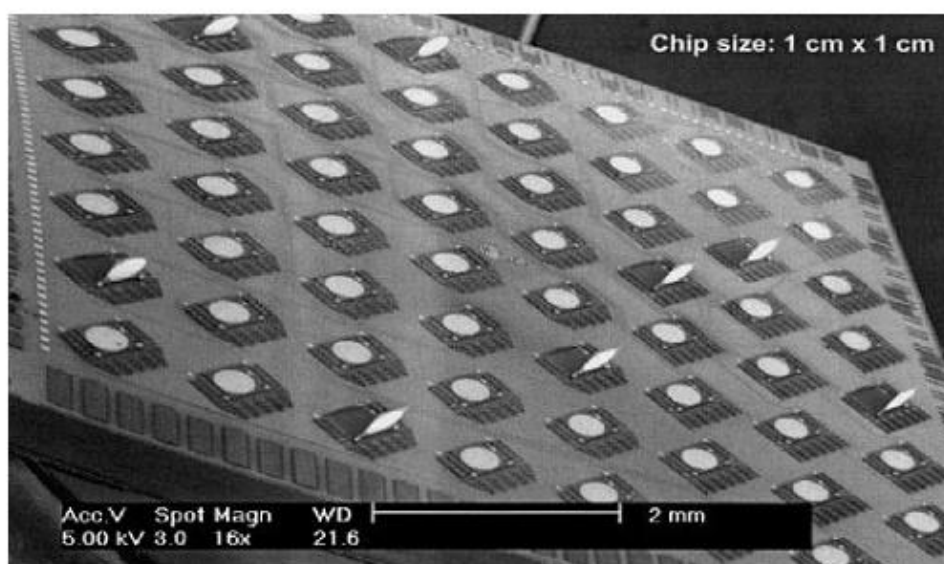


Figura 2.13 Micrografia de uma MEMS com rotação livre de espelhos em 2-D [19].

A Figura 2.14 apresenta a configuração tridimensional, onde duas matrizes de micro espelhos estão dispostas de forma que o sinal de entrada sofre duas reflexões, em cada uma das matrizes, para seguir para a fibra de saída. Nesta configuração se pode observar que o número de espelhos necessários para N fibras na entrada e na saída é $2N$.

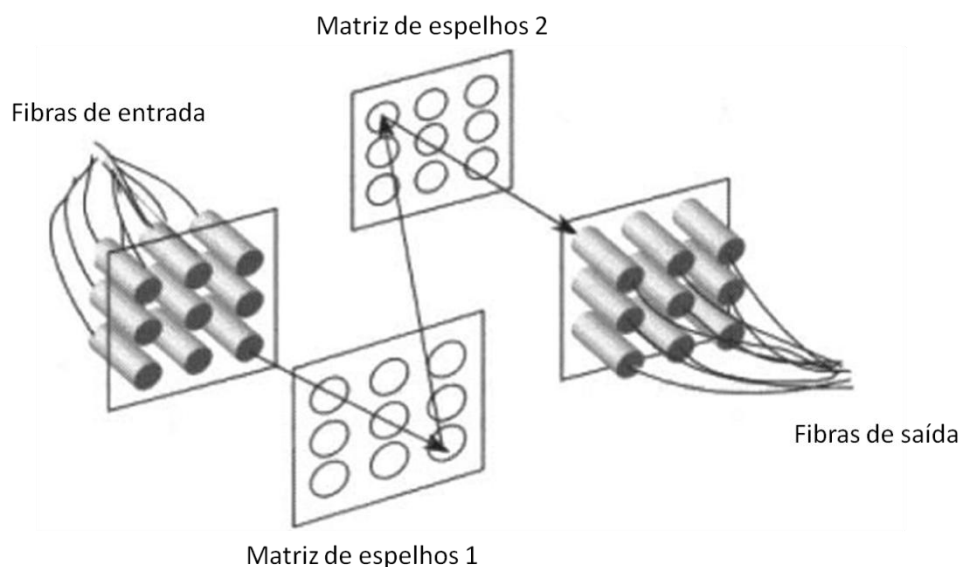


Figura 2.14 chave micro eletro-mecânica de três dimensões [5].

As chaves baseadas na tecnologia MEM começaram a ser comercializadas a partir de 2002 e logo encontraram aplicações em redes WDM [19].

2.1.6 *Arrayed Waveguide Grating (AWG)*

Uma tecnologia que não consta na Figura 2.1 é a AWG. Bastante utilizada na fabricação de multiplexadores e demultiplexadores, também pode promover o roteamento fixo de um sinal óptico em uma dada entrada para uma dada saída baseado no comprimento de onda do sinal. Um sinal composto por vários comprimentos de onda, ao incidir em uma das portas do AWG terá cada um dos seus comprimentos de onda seguindo para uma porta de saída diferente [6].

A Figura 2.15 apresenta um AWG com suas portas de entrada e saída. Cada comprimento de onda está associado a uma porta e não é possível realizar reconfigurações. Dessa forma, substituindo o AWG na matriz de comutação da Figura 1.5, se obtém um OADM.

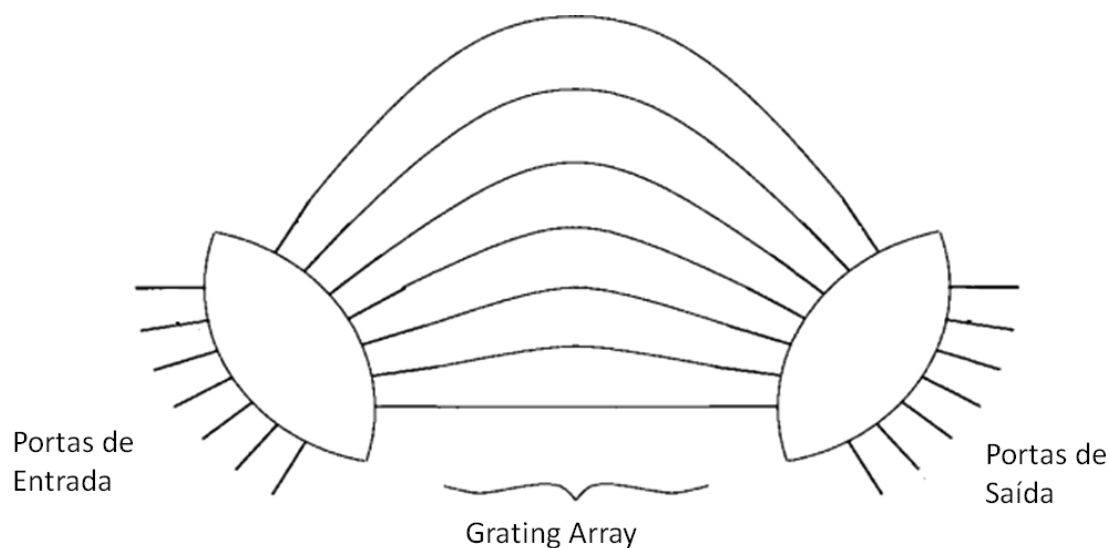


Figura 2.15 AWG adaptado de [6].

2.2 Arquiteturas Baseadas em WSS

Os ROADMs baseados nas chaves seletoras de comprimento de onda apresentam a vantagem de possuir grau mais elevado, não sendo economicamente viável para aplicações em grau dois. Além disso, algumas arquiteturas podem apresentar portas *add/drop* independentes de comprimento de onda (*colorless*) e de direção (*directionless*) do canal, como será apresentado a seguir.

2.2.1 Arquitetura *Colored* (Portas dependentes do comprimento de onda) e *Directional* (Portas dependentes da direção)

Na Figura 2.16 é apresentado um ROADM de grau 3. O sinal vindo de uma direção é distribuído para as demais direções através de um *splitter*. Em cada uma das direções, um WSS é utilizado para fazer a seleção dos canais que seguirão por uma determinada direção.

As portas de adição e remoção de canais são fixas em direção e comprimento de onda e, por esse motivo, a arquitetura apresentada na Figura 2.16 é classificada como *directional* e *colored*, respectivamente. Tais comprimentos de onda são inseridos e retirados do sistema por meio de pares de multiplexadores e demultiplexadores associados a cada direção, respectivamente.

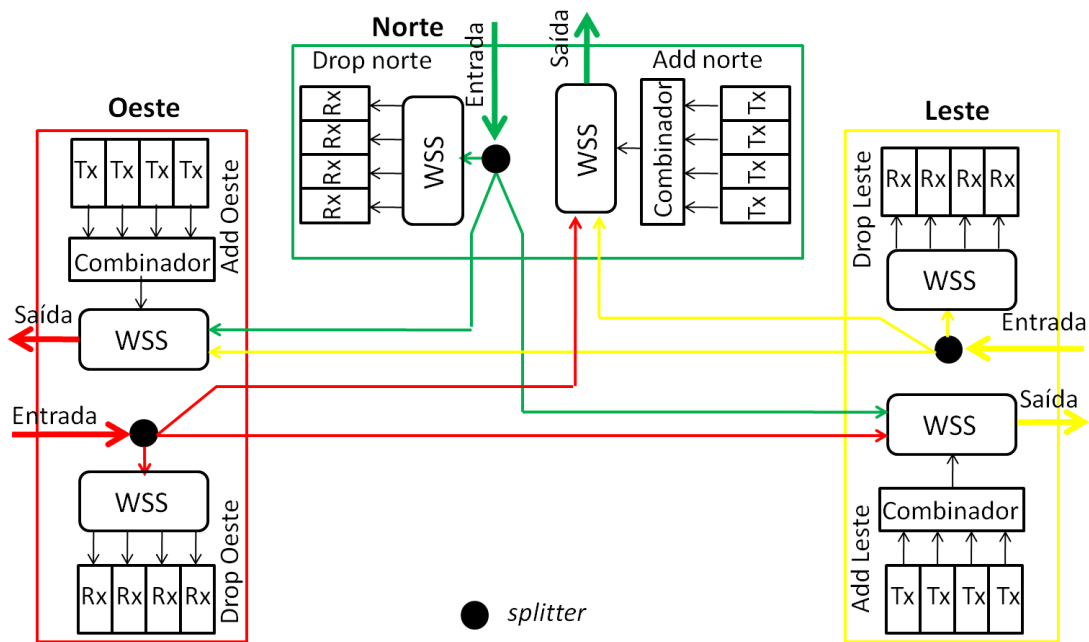


Figura 2.17 Arquitetura para ROADM grau 3 com *colorless* [20].

Nesta arquitetura, tem-se controle remoto total do comprimento de onda e, por isso, é chamada de *colorless*. Porém, para cada direção, tem-se uma porta *add/drop* e os canais adicionados/retirados localmente, mesmo controlados remotamente, só podem seguir em uma direção.

2.2.3 Arquitetura *Colorless* e *Directionless* (Portas independentes da direção)

Por fim, a Figura 2.18 apresenta uma arquitetura onde o nó de grau três possui dois conjuntos de *add/drop*, e os canais são distribuídos para as demais direções através de um *splitter* e selecionados por meio de um WSS.

Dessa forma, os canais adicionados ou retirados localmente podem seguir ou vir de qualquer direção, por esse motivo esta arquitetura é chamada *directionless*.

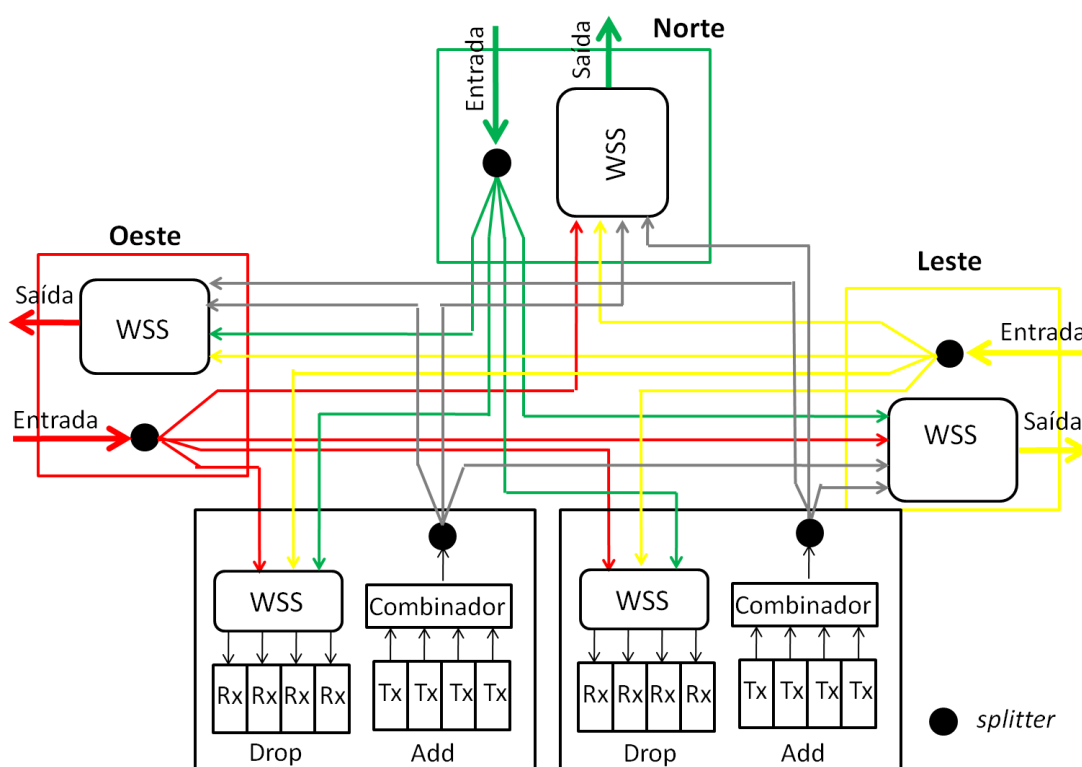


Figura 2.18 Arquitetura para ROADM grau 3 com *colorless* e *directionless* [20].

2.3 Aplicações

Serviços *triple-pay*, que combinam dados, voz e multimídia em um único canal, fizeram crescer o interesse no desenvolvimento e implantação do ROADM. Igualmente, houve um aumento do acesso banda larga pelos usuários finais, com possibilidade de expansão com as novas redes *gigabit passive optical network* (GPON). Todos estes serviços fazem aumentar a quantidade de informação em toda rede, principalmente nas metropolitanas e de longa distância, pois são nestas últimas redes que as informações se encontram e são transportadas tradicionalmente em vários canais multiplexados em comprimentos de onda, WDM, cada um com uma carga baseada na tecnologia SDH/SONET que, por sua vez, carregam pacotes IP/MPLS⁴. Dessa forma, as redes de transporte precisam se adaptar a estas mudanças da melhor maneira possível, se tornando mais flexíveis, com alta capacidade e disponibilidade. Algumas destas características podem ser conseguidas com a implantação do ROADM [21].

⁴Em redes com MPLS (*multiprotocol label switch*), um rótulo é acrescentado ao pacote IP. Nos roteadores seguintes, toda decisão de roteamento é baseado apenas neste rótulo e não mais no cabeçalho IP.

Com os modelos tradicionais de planejamento de rede, ou as operadoras identificam com antecedência os pontos finais de cada circuito óptico e o máximo de largura de banda que o circuito pode exigir ou correm o risco de perder recursos ópticos, alocando a máxima largura de banda para todos os caminhos possíveis. Com a introdução do ROADM, no entanto, há possibilidade de reconfiguração (flexibilidade) da rede, que pode ser remota, proporcionando redução de mão de obra e promovendo uma melhoria significativa em relação aos modelos tradicionais, com menos interrupção de serviços (disponibilidade). É possível ainda que um único comprimento de onda, ou um conjunto de comprimentos de onda arbitrário seja retirado de um nó da rede e seja adicionado novamente ou no mesmo nó ou em outro qualquer [21].

Inicialmente, o custo da instalação do ROADM era muito alto. Por esse motivo, seu uso estava restrito às redes de longa distância, onde seu valor representava uma pequena fração da despesa total da rede. Com o tempo, as inovações técnicas, as melhorias na manufatura e o aumento na implantação fizeram seu custo diminuir e logo o uso do ROADM se expandiu para redes metropolitanas [22] e está a caminho das redes locais [23]. Existem vários estudos, de acordo com a referência [24], que descrevem cenários diferentes, promovendo uma economia de custo com a introdução do ROADM na rede. Os resultados de tais estudos dependem do tráfego e da topologia utilizada, mas demonstram economias típicas de 40 a 80% comparada com uma rede com conversão eletrônica [24]. Atualmente, o ROADM, além de remover e adicionar comprimentos de onda seletivamente e remotamente, passou a denotar o nó de uma rede [25], maximizando o roteamento de canais no domínio óptico [26].

Por volta de 2007, o núcleo das redes ópticas era estático, com camadas TDM (multiplexação por divisão de tempo), basicamente SONET/SDH, transportando pacotes dinâmicos como IP/MPLS. Esta configuração é apresentada na segunda coluna da Figura 2.19, que apresenta a evolução do transporte de dados em uma rede óptica. A tendência é a diminuição da camada TDM, sendo cada vez mais substituída pela camada de pacotes, como mostra a terceira e a quarta colunas da Figura 2.19. Para isso, além de uma camada óptica mais flexível e disponível, é necessário um plano de controle unificado, que integre esta camada óptica, capaz de ser reconfigurada, com a camada IP/MPLS [27], responsável pelo roteamento.

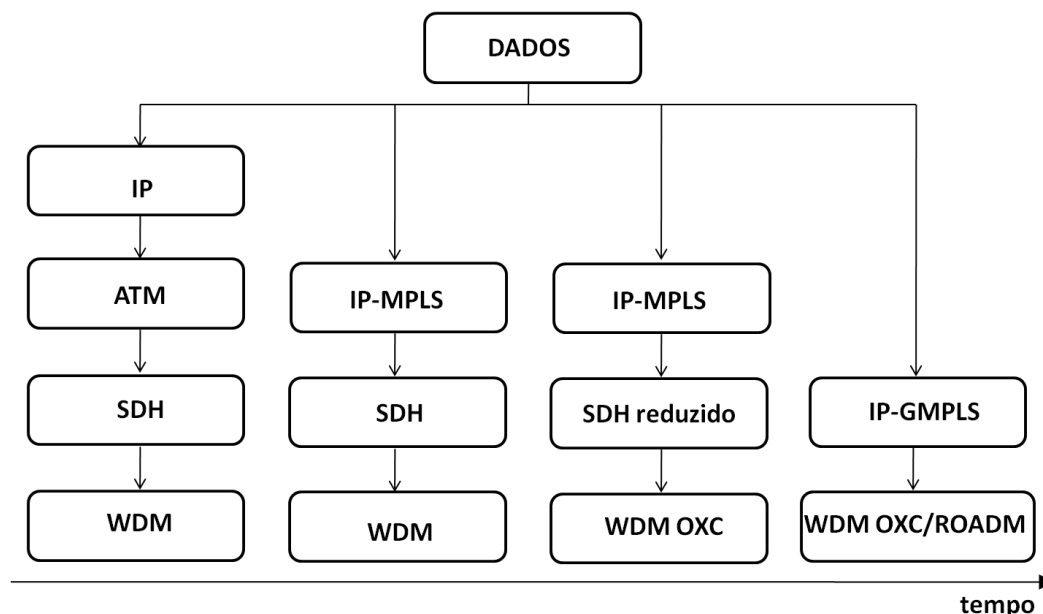


Figura 2.19 Evolução no transporte de dados em uma rede óptica [28].

Existem dois padrões de arquitetura e plano de controle óptico: ASON e GMPLS, respectivamente. ASON, *automatically switched optical network* ou redes ópticas automaticamente comutadas é uma arquitetura desenvolvida pelo ITU-T⁵ que define os componentes no plano de controle óptico e as interações entre estes componentes [29]. O GMPLS, por outro lado, é um plano de controle desenvolvido pela IETF⁶ que promove a alocação dinâmica de recursos e a sobrevivência da rede usando técnicas de proteção e restauração [30].

A Figura 2.20 apresenta as interfaces de uma rede com GMPLS/ASON. Cada elemento da rede no plano de transporte, OXC ou ROADM, são representados no plano de controle pelos controladores de conexão, CC. A interface entre os CCs e os elementos da rede é chamada de interface de controlador de conexão, CCI (*connection controller interface*). Todos os elementos no plano de transporte e de controle estão ligados à NMS, *network management system* ou sistema de gerenciamento de rede, onde o controle e a supervisão são centralizados. Ainda na Figura 2.20, NNI é a interface entre elementos de rede (*network-to-network interface*) e UNI é a interface entre usuário e elemento de rede (*user-to-network interface*). Ambas são definidas pelo modelo de arquitetura ASON e juntas, NNI e UNI possibilitam alocação fim a fim através de múltiplas camadas de rede e domínios [27].

⁵ A ASON é descrita na Recomendação G.8080 do ITU-T

⁶ IETF (*The Internet Engineering Task Force*): cria protocolos em resposta aos requisitos das indústrias

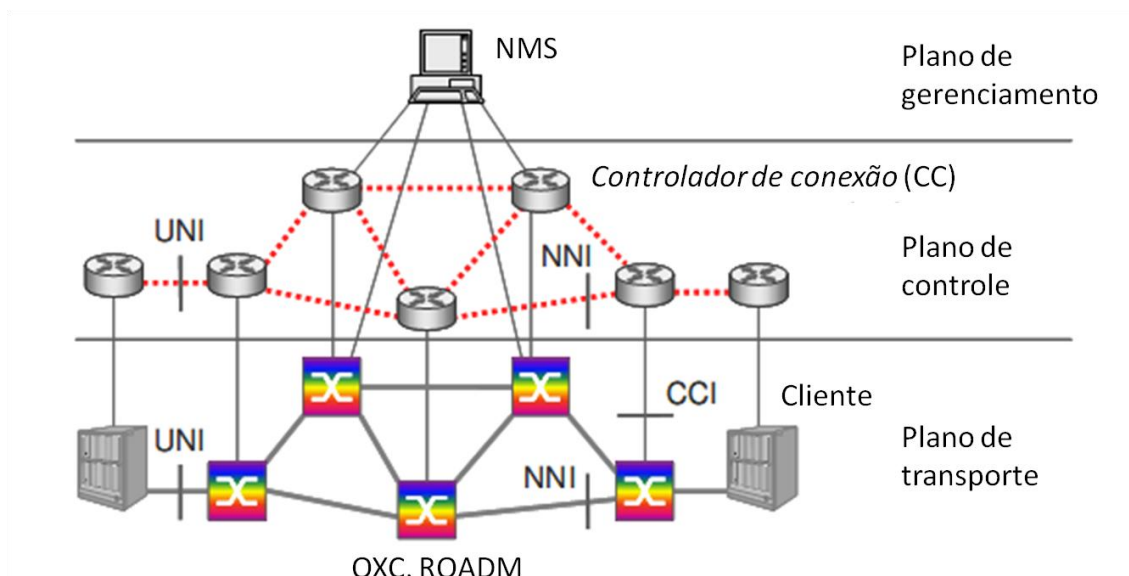


Figura 2.20 Interfaces em uma rede com GMPLS/ASON [27].

Assim, as aplicações do ROADM vão desde as redes de longa distância até as redes locais, passando pelas redes metropolitanas e regionais. Nas redes de longa distância permitem configurações em malha transparentes em relação à taxa de bits, que podem ser de até 40 Gb/s por canal. É esperado que estes mesmos ROADMs suportem as futuras taxas de 100 Gb/s. Enquanto isso, desenvolvimento das chaves seletoras de comprimento de onda (WSS) de baixo custo tem permitido o uso dos ROADMs nas redes metropolitanas e locais [22].

Algumas atribuições fornecidas pelo ROADM às redes ópticas estão listadas e comentadas a seguir.

I. Monitoramento e balanceamento de potência

É possível monitorar cada canal individualmente e realizar a equalização de potência dos canais com a finalidade de prevenir que um canal de alta potência drene a potência dos demais ao passar por um amplificador [27].

II. Planejamento e construção de redes

O processo de planejamento de redes pode ser simplificado numa rede dinâmica desde que a mesma permita o roteamento independente de comprimento de onda e os

amplificadores e mapas de dispersão suportem conectividade entre quaisquer dois nós. Além disso, é necessário que todos os caminhos sejam projetados para atender a exigência de qualidade de sinal para a conexão mais desafiadora, mesmo que o comprimento de onda em questão não experimente essa conexão inicialmente [27].

Além disso, melhorias podem ser aplicadas numa rede dinâmica já instalada sem causar impacto nos serviços existentes [27].

III. Reconfiguração

O plano de controle unificado permite a combinação do IP/MPLS com o ROADMs/OXCs, garantindo uma melhor utilização dos recursos da rede, principalmente nos casos onde há uma forte variação temporal do tráfego em uma rede IP. Dessa forma, por meio da interface usuário-rede (UNI), é possível alocar capacidades de transporte variadas na rede de transporte [27].

Se a reconfiguração dos comprimentos de onda ao longo da rede for remota, é possível a operadora disponibilizar novos serviços com o mínimo de intervenção de pessoal e com um curto intervalo de tempo [27].

Contudo, a passagem por vários ROADMs pode causar algumas penalidades que precisam ser consideradas no projeto da rede [22]. Tais penalidades podem prejudicar a relação sinal-ruído óptico (OSNR) e o fator de qualidade Q e dependem dos tipos de transmissor e receptor (taxa de transmissão e modulação dos dados), bem como das características das chaves seletoras de comprimento de onda (WSS) utilizadas.

As penalidades mais comuns, encontradas na referência [22], são:

I. Perda de inserção

Como a perda de potência do sinal que atravessa um ROADM é compensada por amplificadores ao longo da rede, que introduzem ruído (ASE) e diminuem a relação sinal ruído óptico (OSNR), aumentando a taxa de erro de bits (BER), é preciso que a perda de inserção do ROADM seja a menor possível para não prejudicar a máxima distância permitida para a propagação do sinal.

Para um ROADM baseado em WSS, esta perda depende do número de graus do ROADM bem como das perdas especificadas nos WSS's.

A Figura 2.21 apresenta como a relação sinal-ruído óptico (OSNR) varia para dois tipos de rede, com distância entre nós, ou enlaces, com perda de 20 e 25 dB e para dois tipos de ROADMs, um com perda de 12 dB e outro com perda de 20 dB.

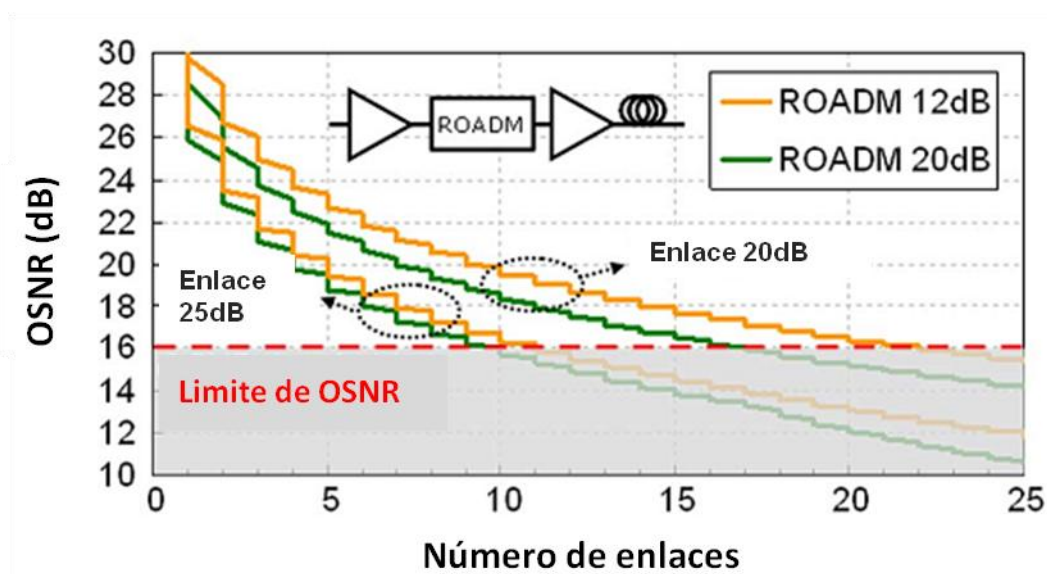


Figura 2.21 Degradação da OSNR para dois valores de perda de inserção = 12 e 20 dB e dois valores de perda de enlace = 20 e 25 dB [22].

Ainda na Figura 2.21 é representado um limite de OSNR para o receptor de 16 dB. Ou seja, sinais com OSNR inferiores são reconhecidos como contendo apenas ruído. Para uma perda de inserção maior, mais rapidamente o sinal alcança o limiar de OSNR (curva em verde). Altas perdas nos enlaces também causam o alcance rápido deste limiar.

II. Perda dependente de polarização (PDL)

São perdas que dependem do estado de polarização da onda propagante. Apesar de a sílica apresentar uma PDL baixa, além da fibra óptica, o sinal atravessa vários componentes que apresentam perda que é dependente da polarização do sinal. Apesar da magnitude da PDL ser pequena para cada equipamento, apresentando valores próximos de 0,1 dB, o efeito cumulativo pode ser alto, dependendo apenas do estado de polarização do sinal de entrada [5].

Para o ROADM não é diferente. A Figura 2.22 apresenta a variação da relação sinal-ruído óptico (OSNR) para alguns valores de PDL ao longo de uma rede de transporte óptico com vários enlaces. É possível notar que as curvas referentes a cada valor de PDL vão se

distanciando uma da outra na medida em que o número de enlaces aumenta, de forma que o efeito PDL passa a ser mais significativo (curvas mais distantes entre si) a partir de um número de enlaces superior a 19 (para o enlace de 20 dB de perdas).

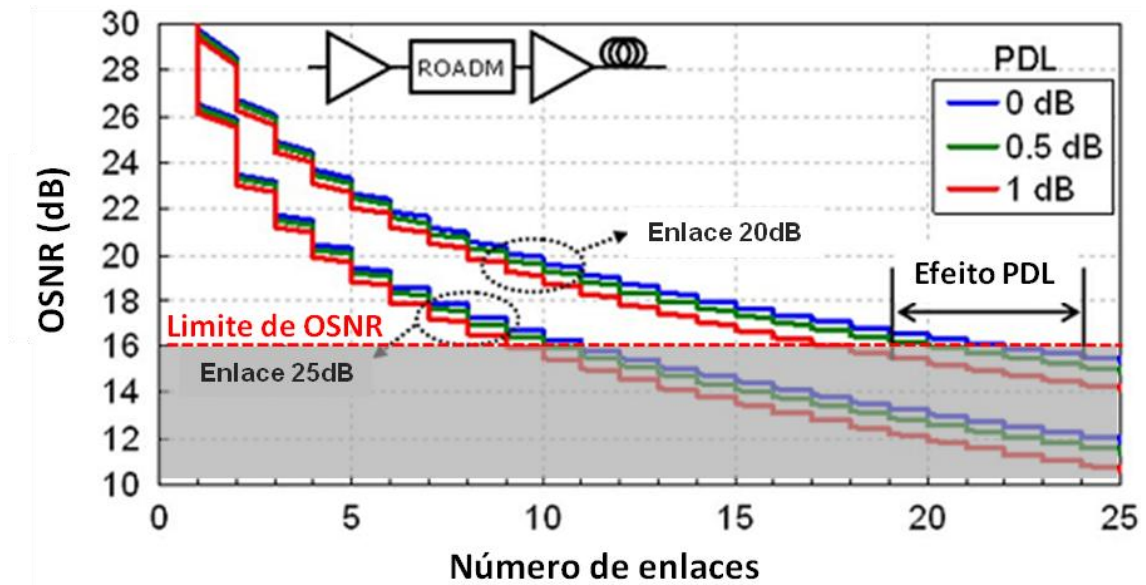


Figura 2.22 Degradação da OSNR para valores de PDL iguais a 0; 0,5 e 1 dB, perdas de enlace de 20 e 25 dB e com perda de inserção fixa de 12 dB [22].

III. *In-band crosstalk*

Quando um canal é retirado de um nó, ele deve ser filtrado antes da inserção do canal local. Qualquer potência residual que não é bloqueada pode causar um efeito chamado *in-band crosstalk*, que é a interferência do canal que foi retirado no canal adicionado.

IV. Estreitamento de largura de banda

O estreitamento da banda pode ser atribuído à filtragem/formatação do espectro de frequência do sinal óptico ou à distorção dos pulsos ópticos na medida em que atravessam uma sequência de ROADMs. Isso ocorre porque o ROADM possui uma banda passante limitada em comparação à banda do sinal óptico e pelas variações em amplitude e fase dentro da banda do sinal, que são acumuladas na medida em que o sinal (pulso) se propaga através de múltiplos ROADMs.

Dessa forma, o projeto de redes WDM com ROADM, apesar de mais simplificado, requer uma estimativa das suas penalidades que, combinadas com as penalidades devido a outros efeitos de propagação, causam impactos no desempenho da transmissão óptica. Existem ferramentas de software para planejamento de redes que calculam, por exemplo, a OSNR acumulada para cada caminho. Outra forma de determinar tais penalidades é determinar a quantidade de degradação que o sinal apresenta em cada nó quando o sistema ainda não está em operação, e assumir esta degradação constante no tempo. Ou, alternativamente, podem-se estabelecer caminhos ótimos a partir de medidas atuais da qualidade do sinal, obtidas por meio de monitoramentos de desempenho ópticos mais complexos. Já a solução para o estreitamento de largura de banda tem sido conseguida com o desenvolvimento de transponders com alta tolerância para este tipo de penalidade ou com tecnologias de WSS que apresentam uma função de transmissão contínua e uma banda passante (filtro) definida por software. Dessa forma, sinais adjacentes apenas de passagem no nó não necessitam ser filtrados, pois o WSS criará um filtro apenas para os canais que serão retirados [22].

3 Conclusão

A busca por maior flexibilidade nas redes WDM, com possibilidade de adição, remoção e roteamento de canais ópticos em nível de comprimento de onda de forma transparente e remota, promoveu a introdução dos ROADMs, primeiramente nas redes de longa distância. Características funcionais e de integração foram sendo aperfeiçoadas e os OADMs fixos, com conversão O-E-O, evoluíram para os primeiros ROADMs utilizando circuladores ópticos, sem necessidade da conversão O-E-O, seguidos pelos ROADMs baseados em demux-switch-mux (DSM), bloqueador de comprimento de onda (WB), chaves seletoras de comprimento de onda (WSS), dentre outros. Esta evolução proporcionou uma melhor utilização do ROADM nas redes de longa distância, bem como sua introdução nas redes metropolitanas e de acesso.

As redes totalmente ópticas passaram a ser uma realidade, sendo o ROADM seu dispositivo-chave, juntamente com o plano de controle GMPLS, realizando o provisionamento dinâmico de canais fim a fim.

Dessa forma, apesar de penalidades como perda de inserção, perda dependente de polarização, *in-band crosstalk* e estreitamento de largura de banda, provenientes da instalação dos ROADM ao longo da rede óptica, benefícios como transparência, flexibilidade e redução de mão de obra, somados à possibilidade de cálculo de tais penalidades previamente, são suficientes para justificar sua aplicação nas redes ópticas.

Referências Bibliográficas

1. ALCATEL. **Flexible Metro WDM with ROADM and Wavelength Tracker**. Ed 02. 2005.
2. INFONETICS RESEARCH. **ROADM Evolves: Should You Be Paying Attention?**. San Jose, CA: 2006. Disponível em: <<http://www.computerworlduk.com/white-paper/network-hardware-devices/2980/roadm-evolves-should-you-be-paying-attention/?otc=79>>. Acesso em: 27 de jul 2010.
3. TANG, J. M.; SHORE, K. A. Wavelength-Routing Capability of Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers in Dynamic Optical Networks. **Journal of Lightwave Technology**, Houston, v. 24, p. 4296-4303, nov. 2006.
4. ROMERO, M. A. Apresentação: Aula 1. Disciplina: Serviços de Telecomunicações e Redes Faixa Larga. São Carlos, SP. 2010.
5. AGRAWAL, G. P. **Lightwave Technology: Telecommunication Systems**. Rochester, NY: John Wiley and Sons, 2005.
6. MUKHERJEE, B. **Optical WDM Network**. Davis, CA: Springer, 2006.
7. ELDADA, L., et al. **40-Channel Ultra-Low-Power Compact PLC-Based ROADM Subsystem**. DuPont Photonics Technologies, Wilmington, MA. 2005.
8. FAVORETO, F. P. **Plano de Controle GMPLS para Redes Ópticas de Transporte**. 2009. Dissertação de Mestrado - Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES.
9. AL SAYEED, C. A., et al. **The Integration of ROADMs into Next Generation Metro Optical Network**. Pierre Mathieu. Vol. 6343. Ottawa, ON. 2006.
10. ELDADA, L. **ROADM Architectures and Technologies for Agile Optical Networks**. DuPont Photonics Technologies. Wilmington, MA.
11. ELDADA, L. **Optical add/drop multiplexing architecture for metro area networks**: 23 January 2008, SPIE Newsroom. Disponível em:<<http://spie.org/x19262.xml?pf=true&ArticleID=x19262>>. Acesso em: 5 de set 2010.

12. NORTEL. **Evolution to Enhanced Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers (e-ROADM)**. 2006. Disponível em:
<<http://www.nortel.com/solutions/optical/collateral/nn115940.pdf>>. Acesso em: 27 de jul 2010.

13. AL SAYEED, C. A.; VUKOVIC, A.; YANG, O. W. W. **Performance Optimization of PLC-based ROADM Subsystem in Ring-to-Ring Interconnection**. Ottawa, p. 2764 a 2769, 2006.

14. NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION. **High-Performance PLC Optical Switch for ROADM**. 2005. Disponível em:
<http://www.phlab.ecl.ntt.co.jp/eng/theme/2005/e2005_12_01.pdf>. Acesso em: 27 de jul 2010.

15. ADAMS, M. **ROADM and Wavelength Selective Switches**. JDSU. 2008.

16. PADTEC S/A. **ROADM WSS - Introdução à Plataforma e ao plano de controle**. Campinas, SP. 2010.

17. NEILSON, D. T., et al. Wavelength Selective Switching for Optical Bandwidth Management. **Bell Labs Technical Journal**. 2006.

18. ZHANH, A., et al. Integrated liquid crystal optical switch based on total internal reflection. **Applied Physics Letters**, Vol. 86, 2005.

19. AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. Rochester, NY: John Wiley and Sons, 2002.

20. ROORDA, P.; COLLINGS, B. **Evolution to Colorless and Directionless ROADM Architectures**. Ottawa: JDSU, 2008.

21. BERNHEY, R. S.; KANAAN, M. **ROADM Deployment, Challenges, and Applications**. Anaheim, CA. 2007.

22. TIBULEAC, S.; FILER, M. Transmission Impairments in DWDM Networks With Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers. **Journal of Lightwave Technology**. 2010, pp. 557 - 598.

23. STRASSER, T. A.; TAYLOR, J. **ROADMs Unlock the Edge of the Network**. Vol. 46. Toronto. 2008.
24. SCHMIDTKE, H. J.; CHBAT, M. W. Optical Meshed Networks: From Concept to Deployment. **Optical Society of America**. 2006.
25. ADVA OPTICAL NETWORKING. **ROADM Network Design Issues**. Atlanta. 2009. Disponível em:
<http://storage.pardot.com/384/87465/100329_ROADM_Tutorial_OFCNFOEC.pdf>. Acesso em: 27 de jul 2010.
26. HUANG, S.; DUTTA, R. **Research Problems in Dynamic Traffic Grooming in Optical Networks**. Raleigh, North Carolina. Disponível em:
<<http://www.broadnets.org/2004/workshop-papers/TrafficGrooming/WTG2004-Huang.pdf>>. Acesso em: 27 de jul de 2010.
27. GROBE, K. Applications of ROADMs and Control Planes in Metro and Regional Networks. **Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference**. Anaheim, CA. 2007. pp.1-12.
28. Alóia, E. J.; César, A. C.; Murilo, R. A. GMPLS: uma Solução para a Próxima Geração de Redes IP sobre WDM. 2005. **Congresso Nacional de Tecnologia da Informação e Comunicação**. pp. 1-15.
29. METASWITCH NETWORKS. **ASON and GMPLS - The Battle of the Optical Control Plane**. 2009. Disponível em: <<http://www.metaswitch.com/download/asongmpls.pdf>>. Acesso em: 13 de set 2010.
30. **Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture**. The Internet Engineering Task Force (IETF). Disponível em: < <http://www.ietf.org/rfc/rfc3945.txt> >. Acesso em: 10 de set 2010.