

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**ARQUITETURAS E TECNOLOGIAS DE
SUBSISTEMAS ROADM**

São Carlos
2015

LARISSA CARDOSO ZIMMERMANN

ARQUITETURAS E TECNOLOGIAS DE SUBSISTEMAS ROADM

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

Curso de Engenharia de Computação

ORIENTADORA: Prof. Dra. Mônica de Lacerda Rocha

São Carlos

2015

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.

Zimmermann, Larissa Cardoso
Z73a Arquiteturas e Tecnologias de Subsistemas ROADM /
Larissa Cardoso Zimmermann; orientadora Mônica de
Lacerda Rocha. São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia de Computação)
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, 2015.

1. ROADM. 2. Wavelength Selective Switch. 3.
Elastic Optical Networking. 4. Planar Lightwave
Circuitry. 5. Wavelength Blocker. 6. Optical
Superchannel. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Larissa Cardoso Zimmermann

Título: “Arquiteturas e tecnologias de subsistemas ROADM”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido em 25/11/2015.

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADA

Prof. Titular Amílcar Careli César
SEL/EESC/USP

APROVADA

Mestre Arturo Miranda Vera
Doutorando - SEL/EESC/USP

APROVADA

**Coordenador do Curso Interunidades Engenharia de Computação pela
EESC:**

Prof. Dr. Maximilian Luppe

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, por sempre abençoar o caminho que venho trilhando, proporcionando sempre ótimas oportunidades e experiências e colocando ótimas pessoas no meu caminho.

Em segundo lugar, agradeço à minha família, minha mãe Eliana, meu pai Paulo e minha irmã Mariana, por toda paciência, apoio, carinho e amor, além do incentivo para meu desenvolvimento intelectual, contribuindo com o meu sonho de me formar na Universidade de São Paulo. Agradeço também ao meu namorado Thiago pela paciência e apoio nessa reta final da graduação.

Gostaria de agradecer aos professores Adilson Gonzaga, Maximilian Luppe, Alysson M. Costa, Mário Oleskovicz, Evandro Luís Linhari Rodrigues e João Navarro Soares Júnior, por me incentivar e proporcionar um excelente crescimento profissional através de conhecimento e de orientações.

Às professoras Cristina Dutra de Aguiar Ciferri, Elisa Yumi Nakagawa e Mônica de Lacerda Rocha, além dos agradecimentos anteriores, fica minha eterna admiração pelos exemplos de mulheres em áreas tecnológicas, desempenhando suas funções com excelência em cargos usualmente masculinos.

Em especial, à professora Mônica de Lacerda Rocha, meus agradecimentos pela excelente orientação, pelas ótimas dicas e pelo incentivo no desenvolvimento da pesquisa.

No âmbito profissional, fica meu agradecimento especial a Vinícius Geraldo Félix, pela paciência, orientação e compartilhamento dos conhecimentos.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos de curso, que enfrentaram junto comigo todas as dificuldades e barreiras proposta pela graduação. Fica meu agradecimento especial a Lucas Magalhães, Rafael Seiji Ishibe, Lucas Aoki, Ana Elisa Siena, Nivaldo Bondança e Davi Mendes.

*“You must be the change
you wish to see in the world.”*

Mahatma Gandhi

RESUMO

ROADM (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*) é um dispositivo que permite a inserção, o bloqueio e a passagem ou o redirecionamento de feixes de luz. Com o constante aumento das taxas de transmissão de informação, o ROADM é amplamente implementado por provedores de serviços de telecomunicações em redes ópticas metropolitanas e de longas distâncias, com a finalidade de obter flexibilidade a diversas taxas de transmissão de dados.

Os subsistemas ROADM evoluíram dos dispositivos *Wavelength Blockers* (WB), passando pelo *Planar Lightwave Circuitry* (PLC), até chegar ao subsistema mais atual, baseado no *Wavelength Selective Switch* (WSS), que viabiliza a implementação das chamadas redes ópticas elásticas.

O desenvolvimento de sua arquitetura, a partir do subsistema ROADM baseado no módulo WSS, foi inicialmente implementada para grade fixa de comprimentos de ondas, ou seja, com quantidade e espaçamento de canais fixos. Depois, evoluiu para as características *colorless*, *directionless* e *contentionless*.

Foi necessário também o desenvolvimento de uma arquitetura ROADM com grade flexível, em que o número e o espaçamento de canais podem ser alterados e modificados conforme a necessidade, proporcionando flexibilidade na alocação e eficiência espectral.

Portanto, todo esse progresso, acompanhado de formatos de modulação eficientes, têm por objetivos evitar a limitação das taxas de transmissão nas redes ópticas, permitir a flexibilidade e a completa reconfigurabilidade propostas pela rede óptica elástica. O presente trabalho busca estudar a evolução dos subsistemas e arquiteturas ROADM no cenário das redes ópticas.

Palavras Chaves: *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer, Wavelength Blocker, Planar Lightwave Circuitry, Wavelength Selective Switch, Elastic Optical Networking, Optical Superchannel.*

ABSTRACT

ROADM (Reconfigurable Optical Add / Drop Multiplexer) is a device that allows the operations add, drop and redirection of light beams. With the steady increase of the information transmission rates, ROADMs have been widely deployed by telecommunications service providers in metropolitan and long-haul optical networks, in order to obtain flexibility at different data transmission rates.

The ROADM subsystems have evolved from Wavelength Blockers (WB) devices, passing by the Planar Lightwave Circuitry (PLC) devices to the most current subsystem, based on Wavelength Selective Switch (WSS), which enables the deployment of elastic optical networks. The evolution of the architecture, from the ROADM subsystem based on WSS, was initially implemented for fixed wavelengths grid, in others words, with fixed number of channels and fixed channel spacing. Later, evolving into the features of being colorless, directionless and contentionless.

It was also necessary to develop a ROADM architecture with a flexible wavelengths grid, in which the number of channels and the channel spacing may be changed and modified as needed, providing flexibility in spectrum allocation and spectral efficiency.

Therefore, all these evolutions and developments, followed by the use of efficient modulation formats, have the goal to avoid the limitation of data rates in optical networks, providing full flexibility and reconfigurability, which are proposed by the elastic optical networks. This work aims to study the evolution of the ROADM subsystems and architectures in optical networks.

Keywords: Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer, Wavelength Blocker, Planar Lightwave Circuitry, Wavelength Selective Switch, Elastic Optical Networking, Optical Superchannel.

SUMÁRIO

Lista de Abreviaturas.....	17
Capítulo 1: Introdução.....	18
1.1 Contextualização e Motivação.....	18
1.2 Objetivo.....	20
Capítulo 2: Revisão Bibliográfica.....	21
2.1 Comunicação Óptica.....	21
2.1.1 Introdução.....	21
2.1.2 Fibra Óptica.....	22
2.1.3 Redes Ópticas.....	25
2.2 Modulação em Sistemas Ópticos.....	27
2.2.1 PSK.....	27
2.2.2 PAM.....	31
2.2.3 QAM.....	32
2.2.4 Comparações entre as modulações.....	34
2.3 Bases de Transmissão.....	35
2.3.1 Comprimentos de onda e Frequência.....	35
2.3.2 Espaçamento de canal.....	36
2.3.3 Bandas C e L.....	36
2.3.4 Eficiência espectral.....	37
Capítulo 3: Sistema ROADM.....	38
3.1 Sistemas OADM e ROADM.....	38
3.1.1 OADM.....	38
3.1.2 ROADM.....	39
3.2 Evolução dos subsistemas ROADM.....	40
3.2.1 <i>Wavelength Blocker</i>	41
3.2.2 <i>Planar Lightwave Circuitry</i>	43
3.2.3 <i>Wavelength Selective Switch</i>	45

3.2.4 Comparação entre os três componentes.....	51
Capítulo 4: Evolução da Arquitetura ROADM.....	53
4.1 ROADM com comprimentos de onda fixos.....	53
4.2 ROADM tipo CD.....	54
4.3 ROADM tipo CDC.....	55
4.4 ROADM para redes ópticas com supercanais.....	58
Capítulo 5: Evolução das Redes Ópticas.....	63
5.1 Redes Ópticas e a Tecnologia WDM.....	63
5.2 Redes Ópticas Elásticas e a Tecnologia OFDM.....	64
Capítulo 6: Conclusão.....	66
Referências Bibliográficas.....	68
Anexos.....	71
Anexo A - <i>Datasheet</i> do produto ROADM WSS Padtec.....	72
Anexo B - <i>Datasheet</i> do produto ROADM WSS grau 8 Infinera.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS

AWG	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>
CD	<i>Colorless-Directionless</i>
CDC	<i>Colorless-Directionless-Contentioless</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
MCS	<i>MultiCast Switch</i>
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
OA	<i>Optical Amplifier</i>
OADM	<i>Optical Add-Drop Multiplexer</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i>
PLC	<i>Planar Lightwave Circuitry</i>
PS	<i>Power Splitter</i>
PSK	<i>Phase-Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
WB	<i>Wavelength Blocker</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WSS	<i>Wavelength Selective Switch</i>

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada a motivação e a contextualização desse trabalho de conclusão de curso. E, além disso, há uma breve introdução e uma curta resenha sobre o desenvolvimento do trabalho e da pesquisa bibliográfica.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

Um ROADM (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*) é um dispositivo que permite a inserção, o bloqueio, a passagem ou o redirecionamento de feixes de luz de vários comprimentos de onda em uma rede óptica. ROADMs são utilizados em sistemas que implementam a multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM, da sigla em inglês, *Wavelength Division Multiplexing*).

Esse sistema pode ser caracterizado pela quantidade de graus, ou seja, o número de direções que um comprimento de onda (ou canal) pode ser roteado; pelas características *colorless* e *directionless*, que consistem na flexibilidade de um comprimento de onda ser roteado para qualquer direção, sendo determinado o percurso óptico de cada comprimento de onda via *software* de controle; pela característica *contentionless*, a qual apresenta uma solução na arquitetura ROADM, evitando a disputa de comprimentos de onda pelos sinais transmitidos, impedindo a perda de informação.

Antes do desenvolvimento de sistemas de multiplexação óptica, como o sistema ROADM, o roteamento de sinais na fibra óptica era feito por meio da conversão de feixes de luz em sinais elétricos através de roteadores elétricos convencionais. Esses sinais elétricos, após roteados, eram convertidos de volta para feixes ópticos.

Em um sistema ROADM convencional, o roteamento dos comprimentos de onda é realizado sem a necessidade das conversões óptico-elétrico e elétrico-óptico, utilizando três funcionalidades fornecidas por sistemas ROADM: inserção, bloqueio e a passagem de feixes ópticos. [1]

A operação de inserção (*add*) faz que um feixe de luz infravermelho ou visível entre na rede óptica. A operação de remoção (*drop*) retira um feixe de luz da rede, tendo como destino,

usuários finais. Um feixe também pode passar pelo dispositivo sem sofrer alterações, é a operação de passagem. A combinação dessas três funcionalidades possibilita que sinais ópticos, de complexidade considerável, sejam roteados. Configurações do sistema ROADM (como o percurso óptico de um comprimento de onda, a largura de banda, entre outros) podem ser alteradas e modificadas remotamente, tornando-o um sistema muito atraente. [1]

A primeira geração ROADM baseava-se na tecnologia WB (*Wavelength Blocker*), cujo funcionamento consiste no bloqueio e na passagem de comprimentos de onda, com objetivo de realizar o roteamento. A segunda geração baseou-se na tecnologia PLC (*Planar Lightwave Circuitry*), cuja complexidade era um pouco superior ao WB. O funcionamento deste consiste no roteamento óptico de comprimentos de onda através da capacidade de controle de potência óptica, proporcionada por multiplexadores e demultiplexadores. [2]

Em decorrência da necessidade de aumentar a largura de banda, o espaçamento de canal, o número de canais e o número de direções (grau) de nós ROADM (até então sendo possível apenas duas direções - grau 2), foi desenvolvida a terceira geração ROADM, baseada na tecnologia WSS (*Wavelength Selective Switch*), o qual é um comutador seletivo de comprimento de onda. Esta tecnologia é a mais dominante em sistemas ROADM atuais e permite um número maior de direção em cada nó ROADM (grau maior ou igual a 9). A partir da tecnologia WSS, houve a evolução da arquitetura ROADM, buscando maior flexibilidade e reconfigurabilidade. [3]

Inicialmente, as redes eram constituídas de nós ROADM com comprimentos de onda fixo, evoluindo para ROADM do tipo CD (*colorless-directionless*), depois para ROADM do tipo CDC (*colorless-directionless-contentionless*) e, finalmente, para ROADM para redes ópticas com supercanais ou arquitetura *flexgrid*. A maior motivação da evolução foi, e sempre será, a necessidade de expansão das taxas de transmissão, as quais envolvem vários fatores de projeto em uma rede óptica, especificamente, neste caso, no sistema ROADM.

Em específico ao ROADM, a evolução foi impulsionada também pela necessidade de estabelecer dinamismo ao sistema, com a finalidade de adaptá-lo a situações transientes e inesperadas. [2]

1.2 OBJETIVO

A proposta desse trabalho é a revisão das diferentes tecnologias de componentes e módulos optoeletrônicos desenvolvidos para uso em sistemas do tipo *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*, ROADM. Serão descritos seus princípios de operação, projetos, características, vantagens e desafios.

Esta monografia está organizada como se segue. No capítulo 2, é apresentada uma breve revisão bibliográfica abordando temas como desenvolvimento histórico e processo evolutivo no contexto de telecomunicações. Também são vistos tópicos direta e indiretamente relacionados com o sistema ROADM.

No capítulo 3, é apresentado o cenário proporcionado pelo sistema ROADM, bem como a mudança nas tecnologias em que ele se baseia.

No capítulo 4, é apresentada a evolução das arquiteturas ROADM baseadas na tecnologia WSS, mostrando o funcionamento, a aplicabilidade, as vantagens e as desvantagens de cada arquitetura.

No capítulo 5, é abordada a evolução das redes ópticas baseadas na tecnologia WDM para as redes ópticas elásticas baseadas na tecnologia OFDM, fundamentada na modificação do sistema ROADM e outros componentes das redes ópticas, no delinear do tempo. É evidenciado os serviços oferecidos, as características e as limitações de cada tipo de rede.

Por fim, no capítulo 6, é apresentada a conclusão da pesquisa e do trabalho de conclusão do curso.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os desenvolvimentos históricos e processos evolutivos no contexto de telecomunicações, abordando tópicos direta e indiretamente relacionados com o sistema ROADM.

2.1 COMUNICAÇÃO ÓPTICA

2.1.1 INTRODUÇÃO

No início da década de 1970, houve um aumento significativo na necessidade de ampliar a capacidade de transmissão dos sistemas sobre os quais se baseava a estrutura de transmissão de informação da época: satélite, rádio e cabo coaxial.

Tentando suportar essa ânsia de expansão somente através destes, teria ocorrido a estagnação da emergente revolução da informação. Assim, inicialmente, alguns pesquisadores consideraram a possibilidade de propagação de sinais ópticos através de tubos ocos. Todavia, a dificuldade prática em reconduzir e direcionar a luz de volta para os cantos era imensa. [4]

Em 1966, Charles K. Kao, engenheiro elétrico chinês, e seu mentor Antoni Emil Karbowiak, engenheiro polonês que foi convidado a ser primeira cadeira na UNSW (*University of New South Wales*, Austrália), foram os pioneiros na transmissão de energia com frequências ópticas (luz) através do vidro. [5]

Então, a fibra óptica foi proposta nos laboratórios da *Standard Telecommunication Laboratories* (STL) por Charles K. Kao e George Alfred Hockham, engenheiro elétrico britânico do grupo de Antoni Karbowiak. Dentro de quatro anos, foram desenvolvidas fibras ópticas que confirmavam e garantiam a teoria envasada por eles. Charles K. Kao ganhou o Prêmio Nobel de Física, em 2009, pelo estudo da fibra óptica, a qual promoveu uma revolução nas telecomunicações, podendo transmitir terabits por segundo. [6]

A seguir, um trecho inicial do artigo escrito por Charles Kao e George Hockham:

“A dielectric fibre with a refractive index higher than its surrounding region is a form of dielectric waveguide which represents a possible medium for the guided transmission of energy at optical frequencies.” [7]

A tecnologia óptica modificou drasticamente os sistemas de telecomunicações: com a fibra óptica, o processamento fotônico de sinais e os sistemas de transmissão e de comutação sem eletrônica nas novas redes se tornaram totalmente possíveis. [8]

Na década de 80, a fibra óptica viabilizava vários requisitos para o avanço dos sistemas de transmissão: largura de banda praticamente ilimitada (numa perspectiva histórica), atenuação e distorção de sinal próximos de zero, custo relativamente baixo e pouco material necessário para sua produção. [8]

Com o passar do tempo e como a necessidade de aumentar a capacidade de transmissão continuava se expandindo, outros gargalos foram constatados, em especial em relação à necessidade do uso de repetidores e amplificadores eletrônicos ao longo da linha. Nos anos 90, esses foram substituídos por amplificadores ópticos, principalmente os baseados na fibra dopada com érbio. Nesta mesma década, surgiram os sistemas multiplexados em comprimento de onda, onde cada sinal óptico (um comprimento de onda distinto) era modulado por um feixe de dados formado a partir da multiplexação no domínio do tempo. Uma vez que pelos sistemas ópticos trafegavam múltiplos comprimentos de onda, surgiu a necessidade de se desenvolver tecnologias para roteamento destas múltiplas portadoras ópticas.

2.1.2 FIBRA ÓPTICA

Muitos tipos de sistemas de comunicação apareceram ao longo dos anos. Todos eles foram motivados e impulsionados pela necessidade de estabelecer uma transmissão e de ampliar a distância de transmissão entre duas estações.

A descoberta da fibra óptica, como citada, é consequência das motivações abordadas e se encaixou perfeitamente ao suprir essas necessidades. No entanto, o que é uma fibra óptica? Como é estruturada e constituída? Como a luz se propaga ao longo da fibra?

A fibra óptica é um condutor de ondas dielétrico que opera na faixa de frequências ópticas (em telecomunicações esta faixa é a do infravermelho), com capacidade de confinar energia

eletromagnética na forma de luz dentro da sua superfície e de guiar a luz em uma direção paralela ao seu eixo. [8]

A estrutura da fibra óptica consiste em um filamento flexível e transparente a partir de vidro ou plástico extrudido com alto grau de pureza e está representada na Figura 1. Como pode ser observado, a fibra é formada basicamente por um núcleo de vidro (onde a luz é guiada), uma casca e um revestimento para proteção mecânica e contra interferências eletromagnéticas externas.



Figura 1. Estrutura da fibra óptica e suas dimensões. [10]

O diâmetro típico do núcleo da fibra varia de $8\ \mu m$ a $62,5\ \mu m$, sendo determinado pelo uso da fibra. Por outro lado, a casca pode apresentar qualquer diâmetro, porém a indústria adotou como padrão o valor de $125\ \mu m$. Da mesma forma, o diâmetro externo do revestimento é da ordem de $245 - 250\ \mu m$. [9]

A fibra faz o uso do princípio da reflexão interna. Para isso, o núcleo deve apresentar um índice de refração levemente superior ao da casca, permitindo, assim, o fenômeno de reflexão interna total da luz. [11] Esse comportamento permite que um feixe de luz, lançado em uma extremidade da fibra, percorra a fibra por meio de reflexões sucessivas, como pode ser observado na Figura 2.

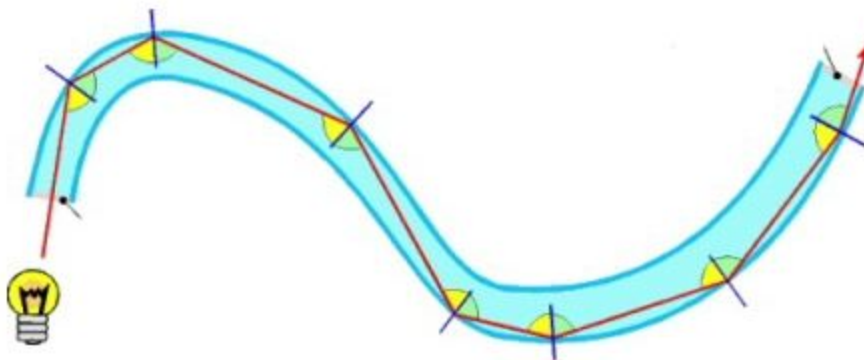


Figura 2. Reflexões sucessivas de um feixe de luz na fibra óptica. [12]

Além disso, as fibras ópticas podem ser classificadas em dois tipos: monomodo e multimodo. Essa classificação é determinada pelos modos de propagação que a luz pode ser transmitida dentro do núcleo. A luz pode se propagar em um único caminho possível, nesse caso a fibra é denominada monomodo; e as fibras que permitem a propagação da luz em diversos modos são denominadas de multimodo, como mostrado na Figura 3. A Tabela 1 indica as diferenças entre os dois tipos de fibra.

Tabela 1. Diferença entre fibras monomodo e fibras multimodo. [13]

Fibras Ópticas Monomodo	Fibras Ópticas Multimodo
Permite o uso de apenas um feixe de luz por fibra.	Tipo mais comum em cabeamentos primários inter e intra edifícios.
Tem núcleo de $8\ \mu m$ a $9\ \mu m$ e uma casca de $125\ \mu m$. Menores dimensões que outros tipos de fibras.	Tem núcleo de $50\ \mu m$ ou $62,5\ \mu m$ e casca de $125\ \mu m$.
Alcance da transmissão superior a 10 km.	Alcance da transmissão inferior a 10 km. Em longas distâncias tem muita perda.
Maior largura de banda passante por ter menos dispersão.	Menor largura de banda passante por ter mais dispersão.
Utiliza comprimentos de onda de $1310\ nm$ ou $1550\ nm$.	Muito utilizado para curtas distâncias pelo preço e facilidade de implementação.

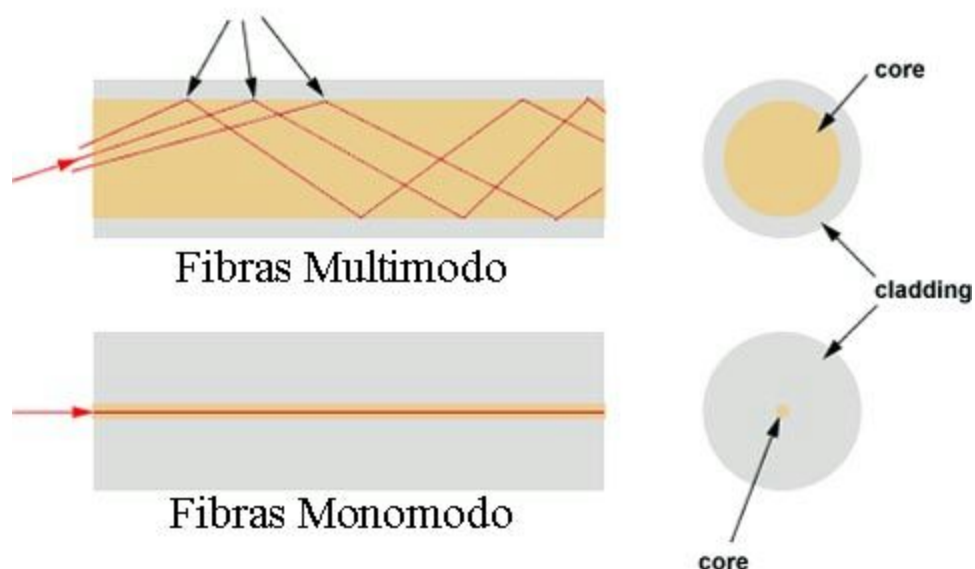


Figura 3. Propagação da luz nos diferentes tipos de fibra. [14]

Em comparação com os cabos convencionais de metal, as fibras ópticas permitem a transmissão de dados por distâncias muito superiores, uma vez que existe menor atenuação no sinal transportado e são imunes a interferências eletromagnéticas, e com maior largura de banda.

2.1.3 REDES ÓPTICAS

Toda vez que uma nova tecnologia aparece com caráter econômica e tecnologicamente vantajoso, ela propulsiona o desenvolvimento de novos sistemas que a utilizam. No caso das rede ópticas, a tecnologia incentivadora foi a fibra óptica, que permeou e possibilitou todo o processo de desenvolvimento. [8]

Uma rede óptica compreende um ou mais sistemas de transmissão por fibra óptica interconectados segundo uma certa topologia e com uma arquitetura que é designada a explorar as características particulares dos sistemas. [8] As redes ópticas são necessárias para suprir a necessidade e demanda de comunicação, atualmente baseadas em diversos serviços que requerem uma alta taxa de transmissão. Esses serviços incluem navegação na Internet, *streaming* de vídeos, teleconferências, imagens médicas de alta resolução, entre outros. Uma

infraestrutura de telecomunicações que suporte todas essas aplicações e serviços em nível mundial, oferecendo alta qualidade, requer redes ópticas de longas distâncias.

Há alguns gargalos importantes que impedem que toda a capacidade de transmissão da fibra óptica seja explorada. Um deles refere-se a uma interface entre redes ópticas *backbone* mais modernas e as redes legadas, que operam com tecnologias mais antigas, proporcionando incompatibilidade de taxa de transmissão. Um outro aspecto é que as arquiteturas de muitas redes em operação não foram projetadas para aproveitar e disponibilizar toda a enorme capacidade disponibilizada pelas fibras. Tais gargalos limitam a possibilidade de expansão da taxa de transmissão no sistema como um todo. [2]

Um dos fatores que menos contribuem para o progresso das redes ópticas e a ampliação do seu desempenho e da sua capacidade é o “problema do ovo e da galinha”. Esse problema, no contexto de telecomunicações, pode ser interpretado da seguinte forma: a demanda e a produção de novos serviços, que podem ser suportados por uma nova infraestrutura de rede óptica, aguardam a construção dessa infraestrutura. E os investidores não irão investir em uma nova infraestrutura de rede óptica, a qual suporta esses serviços, enquanto não for viável economicamente e não houver mercado para esses serviços, tornando-se, assim, algo cíclico. Em suma, a evolução e o progresso da arquitetura e das redes ópticas permanecem estagnados, de certa forma, e totalmente dependentes da demanda dos usuários finais e também do desenvolvimento de tecnologias com custo mais razoável.

2.2 MODULAÇÃO EM SISTEMAS ÓPTICOS

Como o enfoque desta monografia é mais voltado a tecnologias de última geração, nesta seção serão apresentados os formatos de modulação usados nos sistemas mais modernos para modular as portadoras ópticas.

2.2.1 PSK

Da tradução da sigla inglesa *Phase-Shift Keying*, PSK significa chaveamento de fase. Consiste em uma técnica de modulação digital que transmite dados alterando a fase de um sinal de referência (onda portadora). [15] Vários métodos de modulação utilizam um número finito de amostras distintas para representar o dado digital, ou seja, um conjunto discreto do sinal original. O PSK, por outro lado, baseia-se em um número finito de fases, a cada fase é atribuído um único padrão de dígitos binários. Assim, cada fase codifica uma quantidade igual de bits, sendo a fase o símbolo desse método. [16]

Essa técnica pode apresentar várias ordens: BPSK, QPSK e M-PSK. A mais simples é a BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*), cuja alteração de fase pode representar apenas um bit. A Figura 4 indica que para representar o bit 0, será mantida a fase do sinal de referência, e que para representar o bit 1, será deslocada a fase do sinal de referência em 180°. Há também uma exemplificação do método BPSK na modulação de um sinal digital. [16]

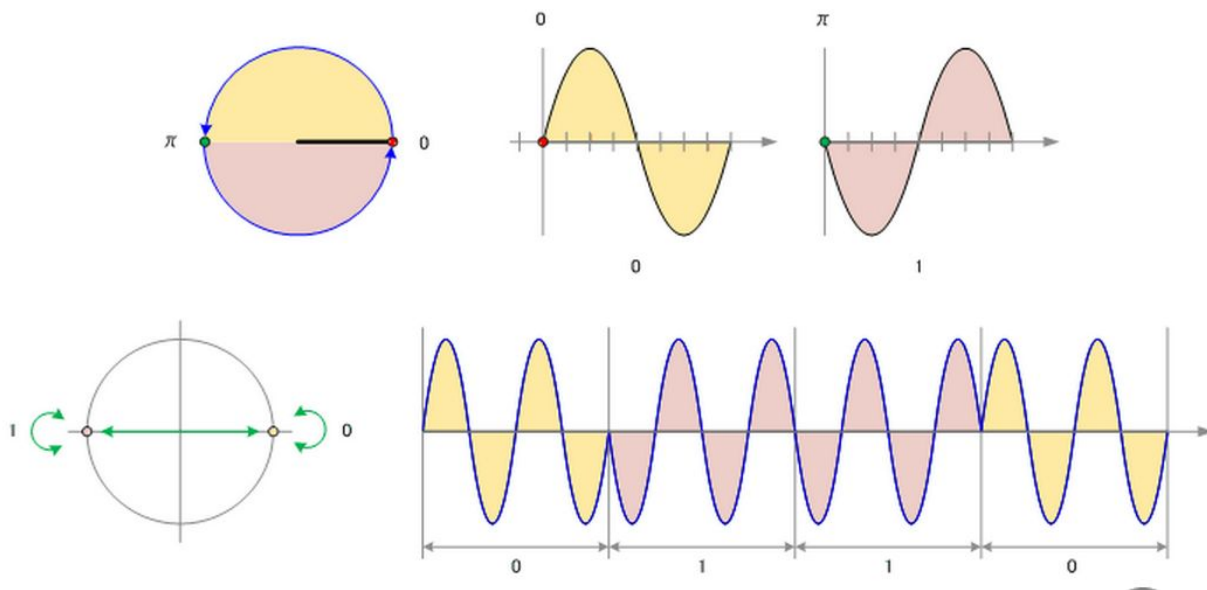


Figura 4. Exemplo da modulação de dados digitais com a técnica BPSK. [16]

Outra ordem técnica PSK é o QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*), em que cada fase codifica 2 bits. Ou seja, para cada símbolo, há o deslocamento da fase do sinal de referência em 45° (00), 135° (01), 225° (11) ou 315° (10).

A Figura 5 representa a relação fase-símbolo da técnica QPSK e, também, há a exemplificação desse método na modulação de um sinal digital.

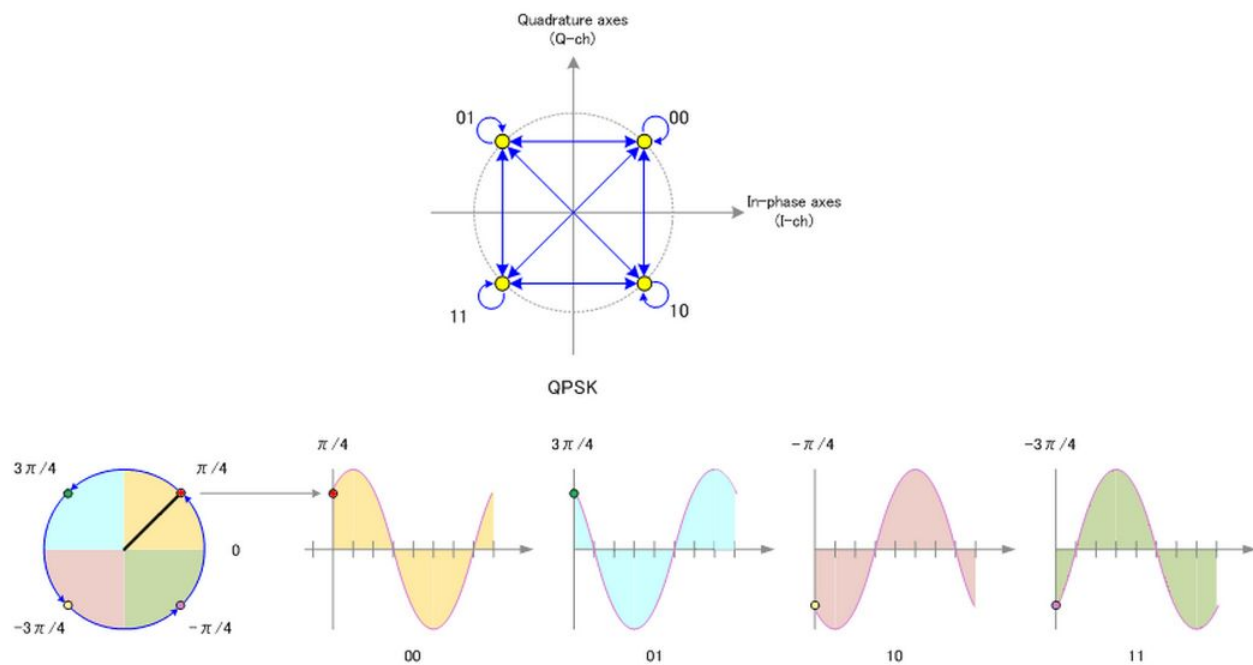


Figura 5. Exemplo da modulação de dados digitais com a técnica QPSK. [16]

A próxima técnica é a modulação M-PSK. O valor de M indica o número de pontos que o diagrama de constelação apresentará. Por exemplo, a ordem de PSK mais utilizada é o 8-PSK, apresentando 8 pontos de fase no diagrama de constelação: 0° (111), 45° (110), 90° (010), 135° (011), 180° (001), 225° (000), 270° (100) e 315° (101). A Figura 6 pode demonstrar esse diagrama de constelação. [16]

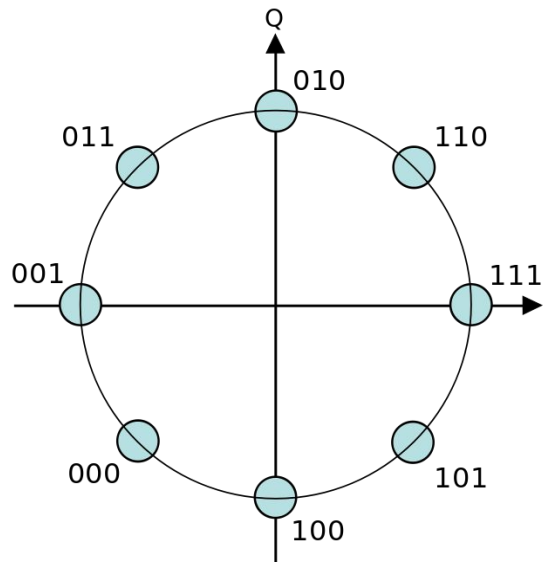


Figura 6. Diagrama de constelação da técnica de modulação 8-PSK. [15]

Como pode ser observado nos três exemplos apresentados, o funcionamento é o mesmo, alterando sempre a ordem do PSK. Quanto maior a ordem, maior a quantidade de bits por símbolo (no caso, o símbolo é a fase).

Na Tabela 2, nota-se que a variação 8-PSK apresenta a maior quantidade de bit por símbolo, ocasionando uma maior eficiência espectral. Tal informação será importante para os próximos capítulos.

Tabela 2. Relação bit por símbolo de cada variante do método PSK.

Modulação	Bits por símbolo
BPSK	1
QPSK	2
8-PSK	3

2.2.2 PAM

A sigla PAM (*Pulse Amplitude Modulation*), em inglês, representa a modulação de amplitude de pulso. Consiste na transmissão de dados por meio da variação da amplitude dos pulsos individuais presentes em uma sequência de pulso elétricos ou eletromagnéticos, regularmente periódicos. Nessa técnica, o símbolo é a amplitude de pulso que identifica unicamente uma sequência de bits.

Há várias ordens de PAM. Por exemplo, 4-PAM indica que há 4 possibilidades de amplitude de pulsos, cada um identificando uma sequência de 2 bits. Em 8-PAM, há 8 possibilidades de amplitude de pulsos, cada um identificando uma sequência de 3 bits. [17]

A Figura 7 ilustra o funcionamento da modulação de amplitude de pulso, em que há uma sequência de pulsos como sinal portador e o sinal analógico é modulado nessa sequência, gerando a informação modulada através da modulação PAM.

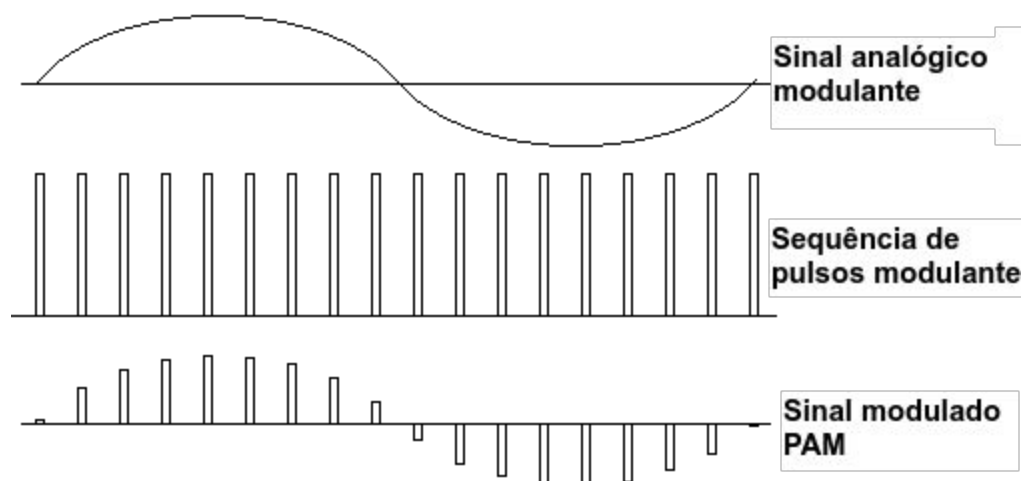


Figura 7. Exemplo de modulação de amplitude de pulso de um sinal analógico. [17]

2.2.3 QAM

QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) é a modulação de amplitude em quadratura. Nesse método, há 2 portadoras com a mesma frequência, porém elas diferem em fase. Desta forma, uma está deslocada em relação a outra em 90° (um quarto de ciclo, dando origem ao nome quadratura). Essas portadoras são moduladas, uma representando a variação em amplitude e a outra a variação em fase. É a combinação da modulação de fase com a modulação de amplitude, gerando uma maior quantidade de símbolos, podendo transmitir a taxas de dados superiores a dos dois tipos de modulação separadamente. [18]

Assim como o PSK, a modulação QAM para dados digitais também pode ser representada pelo diagrama de constelação, no qual os pontos da constelação são normalmente arranjados em grades quadradas, com igual espaçamento vertical e horizontal entre eles.

Usualmente, as formas mais comuns de QAM são 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM. Ao utilizar formatos de modulação de ordens maiores (como 64-QAM e 256-QAM), haverá mais pontos no diagrama de constelação e, portanto, é possível transmitir mais bits por símbolo.

Para exemplificar como a modulação QAM opera, as Figuras 8 e 9 mostram um diagrama de constelação para um sinal modulado com 16-QAM. [18]

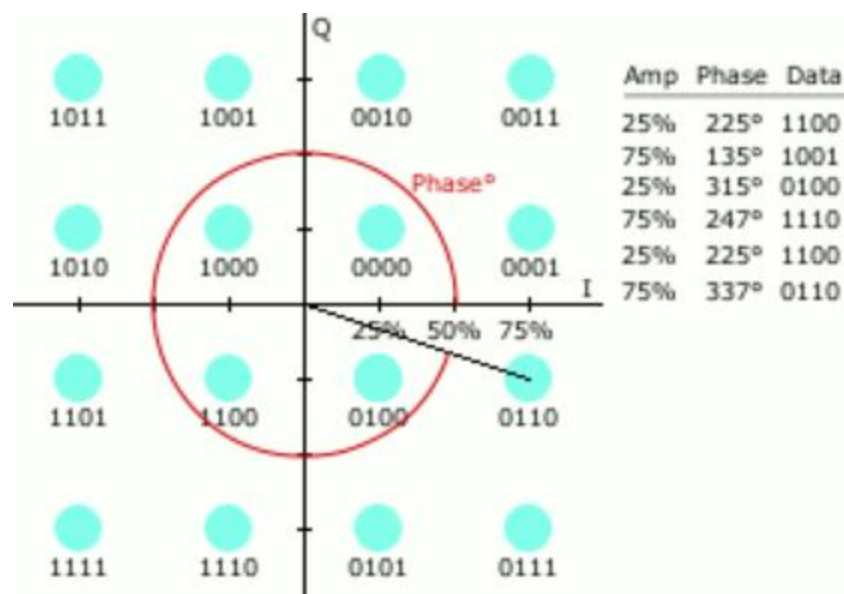


Figura 8. Exemplo da operação da modulação 16-QAM. [19]

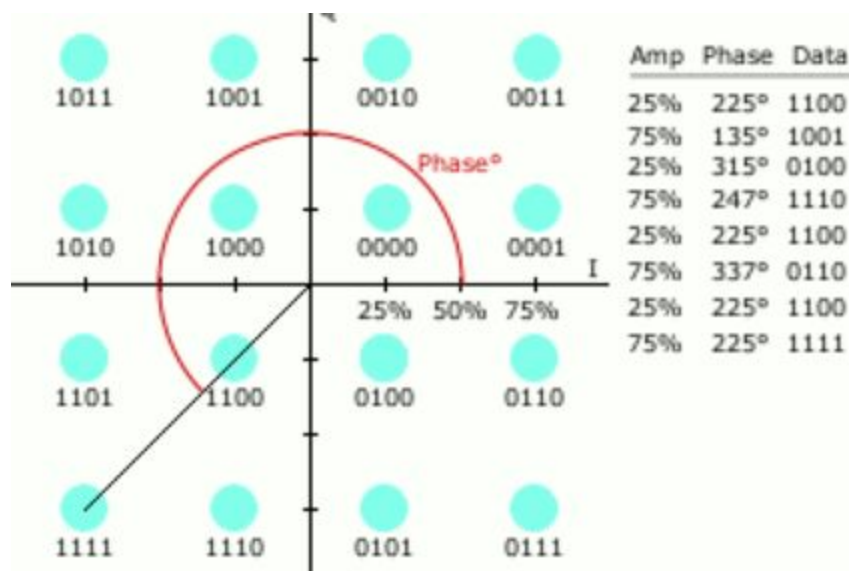


Figura 9. Exemplo da operação da modulação 16-QAM. [19]

A Tabela 3 representa o mapeamento da relação amplitude-fase com os dados a partir da modulação 16-QAM apresentado nas Figuras 8 e 9.

Tabela 3. Mapeamento dos dados pela relação amplitude-fase pela modulação 16-QAM.

Amplitude (em porcentagem da amplitude original)	Fase	Dados
25%	45°	0000
75%	337,5°	0001
25%	67,5°	0010
75%	45°	0011
25%	315°	0100
25%	292,5°	0101
75%	337,5°	0110
75%	315°	0111
25%	135°	1000
25%	112,5°	1001

75%	157,5°	1010
75%	135°	1011
25%	225°	1100
75%	202,5°	1101
25%	247,5°	1110
75%	225°	1111

As modulações 64-QAM e 256-QAM podem transportar 6 e 8 bits por símbolo, respectivamente.

2.2.4 COMPARAÇÕES ENTRE AS MODULAÇÕES

A partir das informações apresentadas nas seções anteriores e analisando a Tabela 4, nota-se que a modulação QAM é a que apresenta as maiores taxas de transmissão de bits por símbolo (como abordado anteriormente), fato desejado em transmissões ópticas. Nos capítulos seguintes, abordar-se-á que a eficiência espectral é diretamente dependente da taxa de transmissão de bit. Deste modo, percebe-se que quanto maior essa taxa, melhor a eficiência espectral. [20]

Portanto, esse fator é o que torna a modulação QAM tão atraente para sistemas de transmissão óptica mais modernos, para as quais são desejadas taxas de transmissão de bits da ordem de 100 e 200 Gbps ou superiores.

Tabela 4. Relação bit por símbolo de cada tipo de modulação.

Modulação	Bits por símbolo
BPSK	1
QPSK	2
8-PSK	3
16-QAM	4
64-QAM	6
256-QAM	8

2.3 BASES DE TRANSMISSÃO

2.3.1 COMPRIMENTOS DE ONDA E FREQUÊNCIA

Quando a tecnologia de multiplexação de comprimento de onda, WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) está em pauta, deve-se abordar os comprimentos de onda e as frequências dos sinais. O comprimento de onda λ e a frequência f são relacionadas pela seguinte equação:

$$c = f \cdot \lambda$$

onde c denota a velocidade da luz no vácuo, $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. A velocidade da luz na fibra óptica é um pouco mais baixa, $2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, em função do índice de refração.

Para caracterizar um sinal WDM, pode ser utilizado tanto a frequência ou o comprimento de onda do sinal. Os comprimentos de onda de interesse das fibras ópticas em comunicação são da ordem de 0,8, 1,3 ou 1,55 μm , os quais localizam-se na faixa do infravermelho, não visível ao olho humano. [21]

2.3.2 ESPAÇAMENTO DE CANAL

Outro parâmetro de interesse é o espaçamento de canal, a qual consiste no espaçamento entre dois comprimentos de onda ou frequências que identificam canais diferentes em sistemas WDM. [21] De acordo com o Setor de Padronização de Telecomunicações da ITU-T, a recomendação G.694.1 do mês de junho de 2012 aconselha que espaçamentos de canais em sistemas WDM ou DWDM sejam um dos valores seguintes: 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz e 100 GHz.

2.3.3 BANDAS C E L

A banda C é a banda convencional, tal nome é dado para uma porção de espectros eletromagnéticos que são utilizados para transmissões a longas distâncias. A faixa de comprimento de onda é de 1530 nm a 1565 nm .

O uso da banda C correspondeu à terceira alocação de banda em comunicações ópticas, também conhecida como terceira janela para uso comercial de sistemas de telecomunicações.

A banda L também é o nome dado para uma porção de espectros eletromagnéticos e é definido pela faixa de comprimentos de onda que variam de 1565 nm a 1625 nm , sendo denominado como comprimentos de onda longos.

Nos sistemas WDM, utilizam-se primeiramente canais com comprimentos de onda da banda C. Se houver a necessidade de mais canais e a banda C não estiver mais disponível, será atribuído comprimentos de onda da banda L para os canais. [21] A terceira janela é a mais utilizada principalmente porque combina dois fatores essenciais para transmissão por longas distâncias: é nesta faixa que a fibra monomodo convencional apresenta mínima atenuação e é onde os amplificadores a fibra dopada com érbio operam.

2.3.4 EFICIÊNCIA ESPECTRAL

A relação entre a taxa de transmissão de bits e o espaçamento de canal é denominada eficiência espectral. Além da avaliação de desempenho sistêmico dada pela taxa de erro de bit (BER, bit error ratio) e pela relação sinal ruído óptica (OSNR, *optical signal to noise ratio*), a eficiência espectral também pode ser usada para análise da qualidade de transmissão de um sistema, podendo ser um fator de comparação. A eficiência espectral é definida pela seguinte expressão:

$$Eficiência\ Espectral = \frac{Taxa\ de\ Transmissão\ de\ Bits\ (bit/s)}{Espaçamento\ de\ Canal\ (Hz)}$$

Observa-se que essa relação entre taxa de transmissão de bits e o espaçamento de canal depende do tipo de modulação utilizada no sistemas óptico. Pois, como visto nas seções anteriores, a modulação do tipo 64-QAM pode transmitir mais bits por símbolos do que as outras técnicas de modulação, interferindo na taxa de transmissão de bits e, por conseguinte, na eficiência espectral. [21]

CAPÍTULO 3: SISTEMA ROADM

Neste capítulo, serão destacadas as evoluções das redes ROADM a partir das expansões de performances e capacidades da tecnologia ROADM.

3.1 SISTEMAS OADM E ROADM

3.1.1 OADM

O OADM é um multiplexador *add-drop* (inserção-remoção) óptico, do inglês *Optical Add-Drop Multiplexer*. Basicamente, é um componente que se baseia na técnica WDM, em que a multiplexação dos comprimentos de onda proporciona o roteamento dos sinais. Nota-se que o funcionamento básico consiste da remoção ou adição de um comprimento de onda específico, de acordo com a localidade do nó OADM.

No caso do OADM, cada comprimento de onda interliga unicamente dois nós da rede óptica e essa configuração da rede é fixa e determinada durante o planejamento da rede. Desta forma, uma vez estabelecido um comprimento de onda identificando unicamente um percurso na rede, essa configuração não será passível de alteração.

Com o advento do módulo OADM, o processamento do sinal em cada nó foi simplificado, pois foi eliminada a conversão óptica-eletrônica para permitir o tráfego dentro de cada nó. Assim, como pode ser visto na Figura 10, dentro do nó, há a conversão óptica-eletrônica no bloco de regeneração. Já na Figura 11, há o roteamento dos sinais baseado no comprimento de onda, identificado pelo módulo OADM, a conversão óptica-eletrônica ocorre apenas quando o sinal é removido de um nó OADM (processo de *drop*), otimizando o tempo e reduzindo custos. [2]

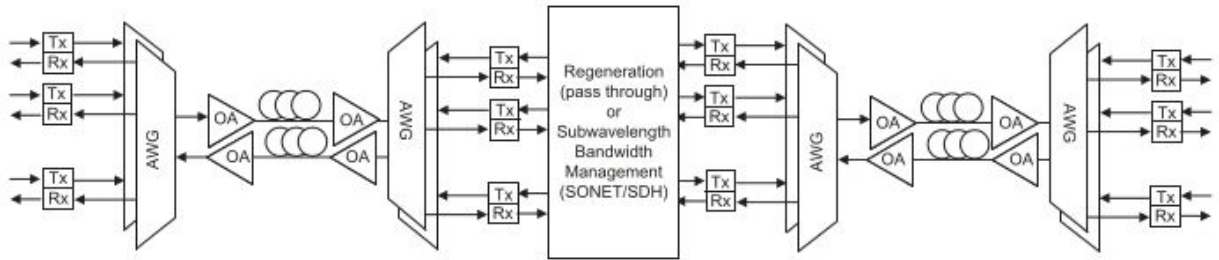


Figura 10. Diagrama de um sistema de transmissão DWDM implantando multiplexadores e demultiplexadores de comprimentos de onda fixo e regeneração eletrônica. [2]

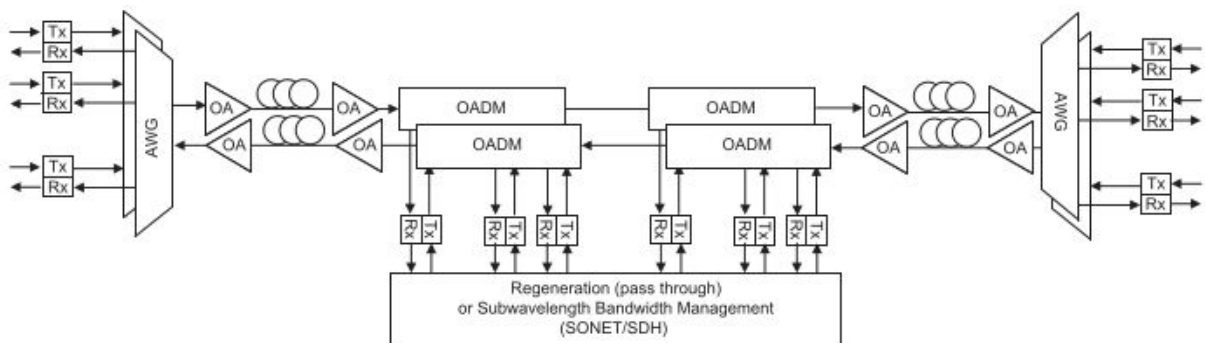


Figura 11. Diagrama de um sistema de transmissão DWDM implantando OADMs de comprimentos de onda fixo para add-drop óptico. [2]

3.1.2 ROADM

O ROADM é um multiplexador *add-drop* (inserção-remoção) óptico reconfigurável, do inglês *Reconfigurable Optical Add-/drop Multiplexer*. É também um mecanismo que se baseia na técnica WDM, proporcionando o roteamento de comprimentos de onda para as localidades determinadas.

O ROADM funciona da mesma forma que o OADM. No entanto, a principal diferença consiste em que cada conexão de comprimento de onda interligando unicamente dois nós da rede óptica é estabelecida de maneira reconfigurável. Assim, em um nó OADM, o caminho para o qual um comprimento de onda foi estabelecido é uma configuração fixa, sendo determinada

durante o projeto da rede (ou podendo ser alterada de forma manual). Em um nó ROADM, essa relação única entre comprimento de onda e o caminho na rede pode ser alterada automaticamente (via *software* de controle). Todavia, é extremamente necessário que, apesar de ser reconfigurável, cada comprimento de onda seja relacionado com apenas um percurso na rede.

Como se observa na Figura 12, a configuração da rede com nós ROADM é igualmente a da rede com nós OADM, apresentada na Figura 11 anterior. [2]

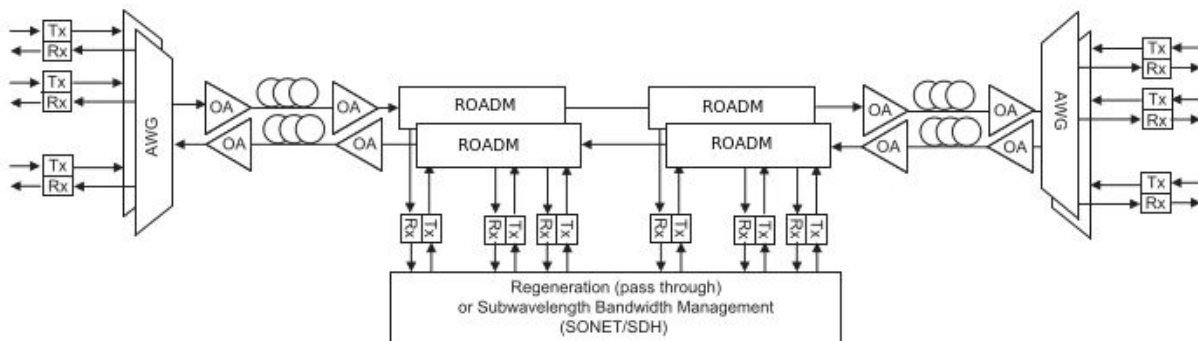


Figura 12. Diagrama de um sistema de transmissão DWDM implantando ROADMs de comprimentos de onda fixo para add-drop óptico. [2]

Uma das vantagens da rede ROADM é que esses roteadores ópticos não apresentam taxa de transmissão especificada. Assim, com adaptações técnicas como a substituição de módulos com comprimentos de onda especificado (transponder, por exemplo), o uso do módulo MCS e entre outras, um sistema ROADM pode se adaptar diante futuros aumentos da demanda na taxa de transmissão, evitando a obsolescência. [22]

3.2 EVOLUÇÃO DOS SUBSISTEMAS ROADM

A arquitetura de subsistemas ROADM desenvolveu-se com o decorrer do tempo. Nota-se que o processo de roteamento do sistema ROADM é baseado em comprimentos de onda: cada comprimento de onda identifica um caminho, estabelecendo a ligação entre dois pontos ou dois nós da rede. Há divergências entre os sistemas OADM, em que esses caminhos são

pré-estabelecidos para cada comprimento de onda, e os sistemas ROADM, em que esses caminhos são reconfiguráveis para cada comprimento de onda. Entretanto, reconfigurável ou não, cada comprimento de onda é atribuído a um caminho, unicamente.

Dessa atribuição única, a seleção e o roteamento ocorrem mediante o comprimento de onda, ou seja, através do comprimento de onda sabe-se para onde vai o sinal modulado. Observa-se que todo esse processamento ocorre no nível óptico, não tendo, assim, a leitura de protocolos para a realização do roteamento.

Na sequência, serão apresentadas a evolução das arquiteturas dos subsistemas ROADM, as quais se basearam em três componentes diferentes: WB, PLC e WSS.

3.2.1 WAVELENGTH BLOCKER

Wavelength blocker (WB) foi o primeiro módulo de comutação de canais disponível comercialmente para ROADM. O WB é um componente de bloqueio de comprimento de ondas, da tradução literal do inglês. Introduziu-se em sistemas ROADMs de grau-2, consistindo, desta maneira, em nós com dois pares de fibras ópticas bidirecionais.

Essa configuração pode ser observada na Figura 13, com dois componentes *wavelength blocker* constituindo um nó ROADM grau-2. [2]

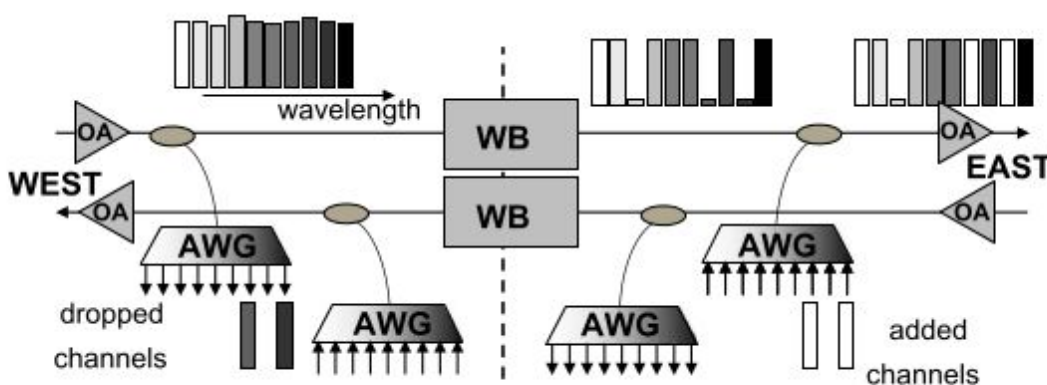


Figura 13. Diagrama de um nó ROADM grau-2 com dois Wavelength Blockers. [2]

O *wavelength blocker* é um equalizador de canal dinâmico (DCE: *Dynamic Channel Equalizer*), em que a máxima atenuação proporciona as funcionalidades de bloqueio e de permanência de um canal. Consiste em um dispositivo de duas portas que podem independentemente atenuar (bloquear) cada ou qualquer combinação de comprimentos de onda. [22]

Observando somente o módulo WB na Figura 14, nota-se que há três estágios funcionais. O primeiro estágio consiste no elemento dispersivo, onde os comprimentos de onda (canais) são espacialmente separados através de uma rede de difração. No segundo estágio, os comprimentos de onda encontram uma matriz espacial de atenuadores ópticos, os quais são controláveis para permitir a decisão de quais comprimentos de ondas vão ser atenuados ou não. E, finalmente, todos os comprimentos de onda espacialmente dispersos são recombinados e lançados na fibra óptica de saída. [22]

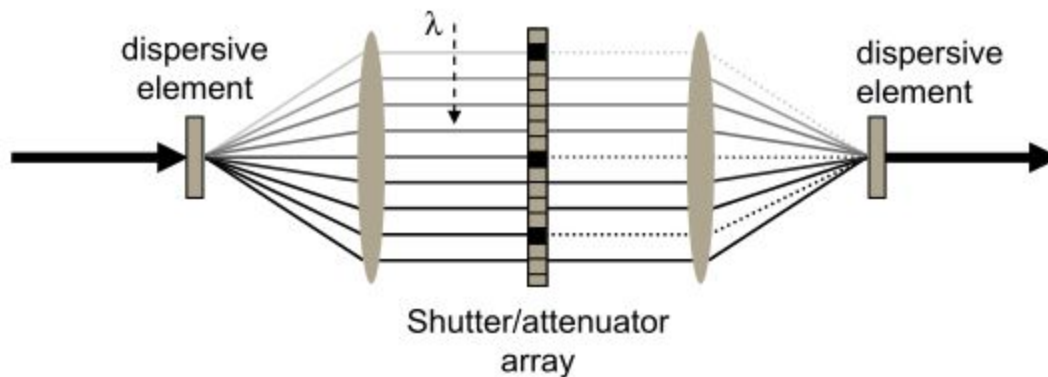


Figura 14. Diagrama funcional do componente WB. [2]

De maneira geral, o dispositivo WB impossibilita a passagem dos canais (comprimentos de onda) que devem parar no nó em questão, impedindo sua continuação na rede. É uma solução simples que pode ser aplicada apenas em nós ROADMs de grau-2 (duas fibras de entrada e duas fibras de saída) da rede.

A habilidade do WB de manter dinamicamente e apuradamente os níveis de potências dos canais na faixa desejada de operação aumenta a estabilidade, a performance e a confiabilidade de transmissão. Resulta, em consequência, em custos operacionais baixos.

Além disso, o módulo WB também permite o reaproveitamento dos comprimentos de onda assim que os canais são removidos (ou seja, aqueles comprimentos de onda que foram bloqueados podem ser inseridos novamente pelo mesmo sistema ROADM através do módulo

de *add*), proporcionando um crescimento flexível da rede através do reuso de comprimentos de onda. [22]

3.2.2 PLANAR LIGHTWAVE CIRCUITRY

Planar lightwave circuitry (PLC) é um circuito planar de ondas eletromagnéticas, da tradução literal do inglês. É resultado da evolução natural da tecnologia do componente ROADM, a qual se resume em integrar o roteamento óptico de comprimentos de onda com a capacidade de controle de potência através de multiplexadores e demultiplexadores de canais. [2]

A Figura 15 representa a solução funcional para o módulo PLC.

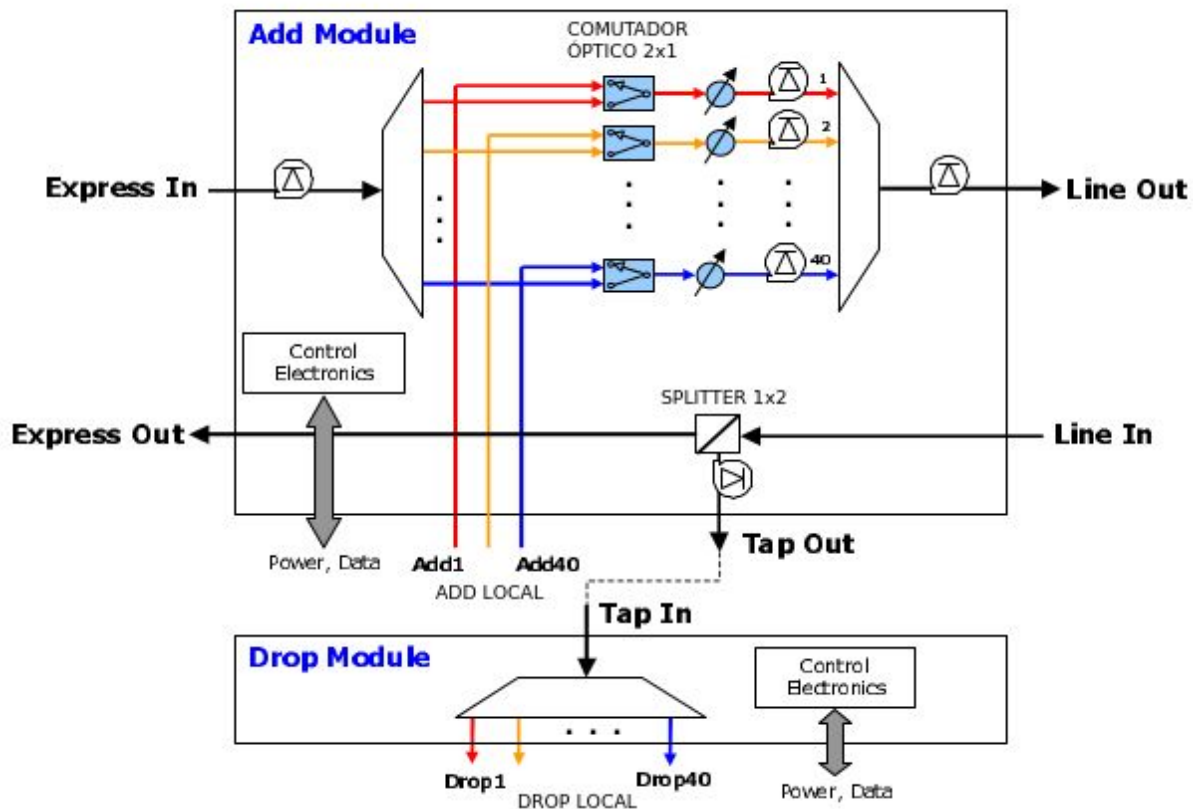


Figura 15. Arquitetura de um módulo PLC. [22]

Ao analisar a figura 16, percebe-se que o PLC ROADM equivale-se a um par de módulos PLC.

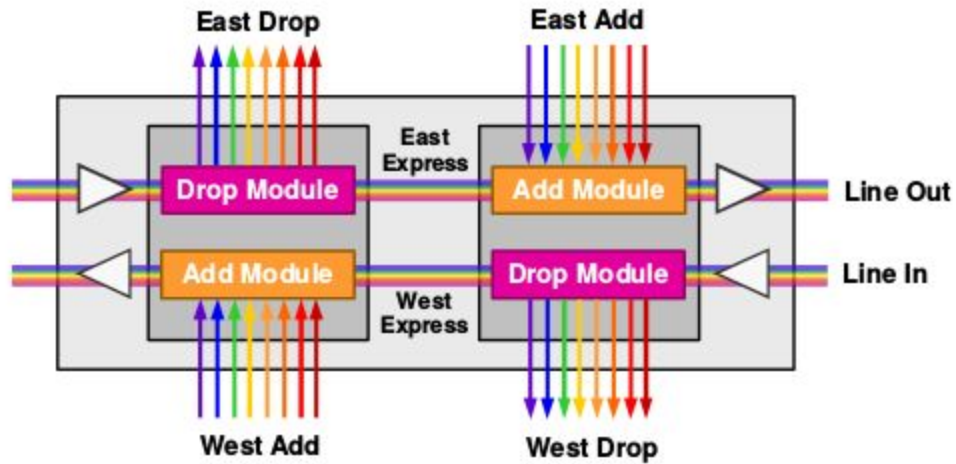


Figura 16. Arquitetura geral de um nó PLC ROADM grau-2. [22]

Na Figura 17, observa-se, mais detalhadamente, que um nó PLC ROADM grau-2 é constituído de dois componentes PLC, como o apresentado na Figura 15.

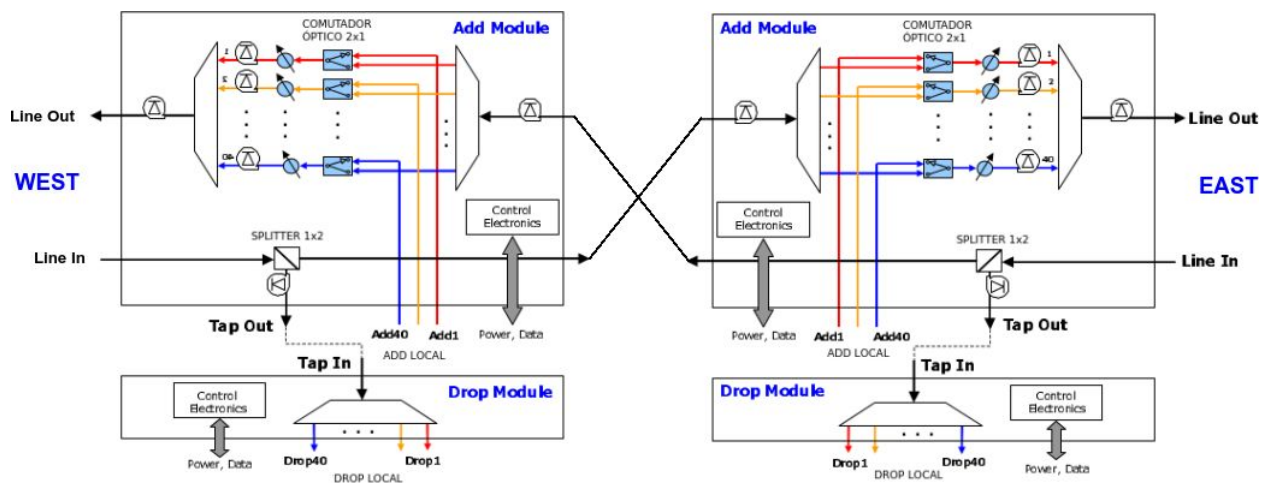


Figura 17. Diagrama de um nó PLC ROADM grau-2. [22]

Similar ao WB, o sinal óptico de entrada *Line In West* é duplicado pelo *splitter* 1x2. Uma cópia óptica é enviada a um demultiplexador AWG para realizar o *drop* local proveniente do módulo PLC *West*: assim, somente os canais que devem ser removidos serão recebidos localmente. A outra cópia óptica é enviada para a entrada *Express In* do outro módulo PLC *East*. Nesse último caso, a cópia é demultiplexada, separando o sinal em comprimentos de onda.

Cada comprimento de onda da cópia óptica é direcionado para uma entrada do comutador óptico 2x1. A outra entrada do comutador óptico 2x1 recebe os comprimentos de onda adicionados através do *add* local proveniente do módulo PLC *East*. Assim, esse comutador óptico 2x1 funciona como uma chave e irá selecionar para cada comprimento de onda a sua origem: se será da cópia óptica (*Express In*) ou do *add* local, permitindo a característica reconfigurável do ROADM. Selecionados os comprimentos de onda, serão multiplexados em um sinal óptico através do multiplexador AWG e enviados para a saída *Line Out East*, seguindo para a direção leste. O mesmo ocorre para o sentido *East -> West*.

Observa-se também que nós ROADM construídos a partir de módulos PLC são limitados à implementação de grau-2. Outra característica crítica da tecnologia PLC-ROADM é a capacidade limitada para projetar multiplexadores AWG com uma banda de passagem de canais ampla e plana.

Em redes metropolitanas, isso é uma desvantagem, visto que, nessas redes, um canal óptico qualquer pode propagar-se através de 16 ou mais nós. Portanto, a filtragem repetitiva realizada pelos multiplexadores e demultiplexadores AWG reduz progressivamente a largura de banda disponível para cada canal.

Logo, a necessidade de aumentar cada vez mais largura de banda de cada canal, através de 16 ou mais nós ROADM e com um espaçamento de canal de 50 GHz, tornou-se uma limitação severa para redes que são constituídas por nós PLC-ROADM. Assim, nas redes atuais, essa arquitetura ROADM foi perdendo espaço. [2]

3.2.3 WAVELENGTH SELECTIVE SWITCH

O dispositivo *Wavelength Selective Switch* (WSS) é um comutador seletivo de comprimento de onda, da tradução literal do inglês. É a terceira geração da tecnologia ROADM e a mais dominante em sistemas ROADM atuais.

A Figura 18 representa a funcionalidade de um dispositivo WSS 1xN.

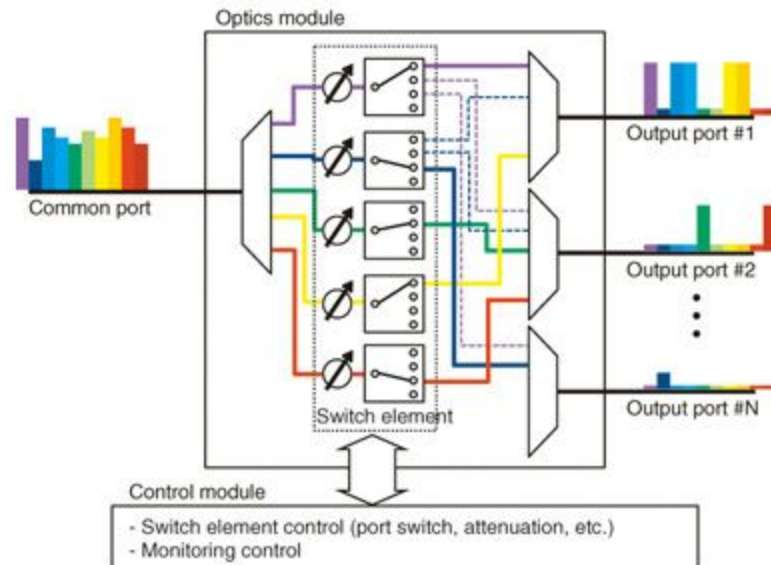


Figura 18. Diagrama funcional de um dispositivo WSS. [3]

Um dispositivo WSS 1xN, como demonstrado na Figura 18, é capaz de rotear independentemente cada canal inserido na porta de entrada para qualquer uma das N portas de saída. Observe que, quando $N = 1$, o WSS apresenta a mesma funcionalidade que um WB. [2]

As funções principais desse dispositivo são rotear os comprimentos de onda para as portas de saída através de um comutador de porta e atenuar a luz, de maneira que o nível de potência da luz transmitida é ajustado para cada comprimento de onda.

O *hardware* do módulo WSS é dividido entre módulos ópticos e de controle e esses módulos podem ser observados na Figura 19.

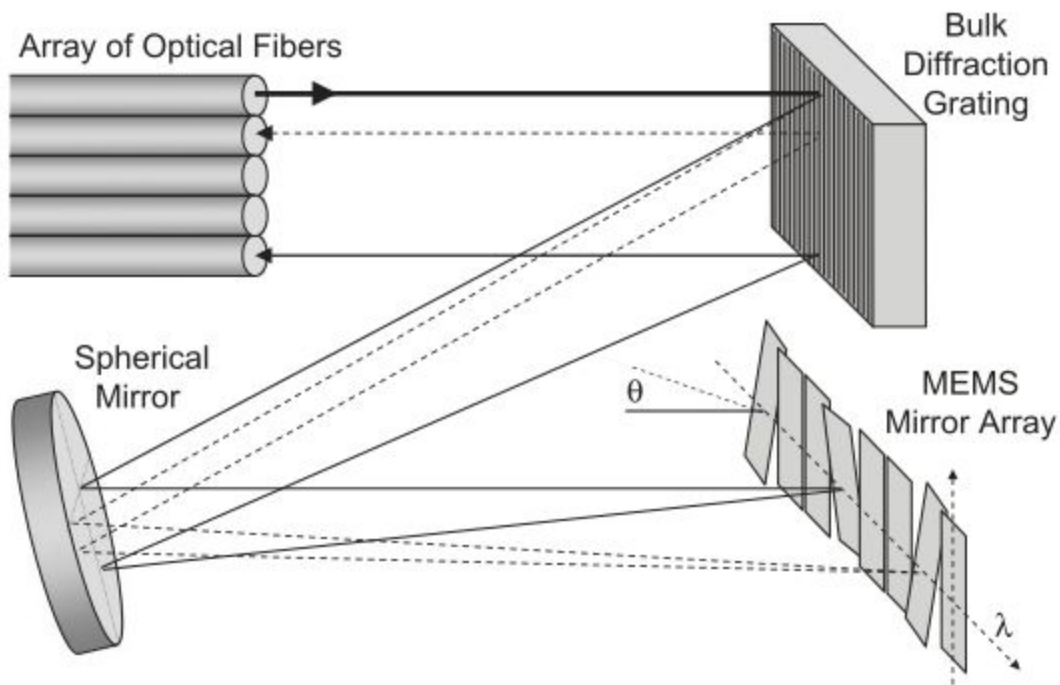


Figura 19. Exemplo geral do design interno de um módulo WSS. [2]

O sinal de luz contendo um conjunto de comprimentos de onda é inserido pela única porta de entrada do WSS. Esse sinal é direcionado para um dispositivo de dispersão de comprimento de onda conhecido como grade de difração (*diffraction grating*) e os canais são obtidos separadamente: cada comprimento de onda é difratado em um ângulo diferente. [3]

Esses comprimentos de onda são refletidos em um espelho esférico até atingir um vetor de atuadores de ângulo de deflexão (*deflection angle actuators array*), incluindo um sistema de vetores de espelhos microeletromecânico (*MEMS mirror, Micro-Electro-Mechanical Systems*) ou vetores de moduladores de fase de cristal líquido em silício (LCOS, Liquid Crystal on Silicon), os quais podem alterar a direção de reflexão de cada feixe de comprimento de onda. Assim, cada combinação de comprimento de onda e porta devem apresentar um único caminho de feixe (direção de reflexão única). Todos os caminhos de feixe devem ser estáveis e apresentar perdas muito baixas.

Portanto, cada canal pode ser independentemente roteado através do ajuste do ângulo de reflexão de cada atuador, presente no MEMS ou no LCOS. Dessa maneira, o respectivo comprimento de onda irá ser transmitido para a porta de saída desejada.

Para operar um WSS com mais portas de entrada, o funcionamento é basicamente o mesmo descrito, só que haverá mais atuadores (MEMS ou LCOS) para suportar o sinais que chegam e separá-los em seus respectivos comprimentos de onda, encaminhando cada um para a porta de saída ou sendo bloqueados.

Após a explicação da funcionalidade do WSS e da descrição do seu *hardware*, serão introduzidos dois tipos de arquiteturas ROADM contendo o módulo WSS.

A primeira arquitetura pode ser vista na Figura 20.

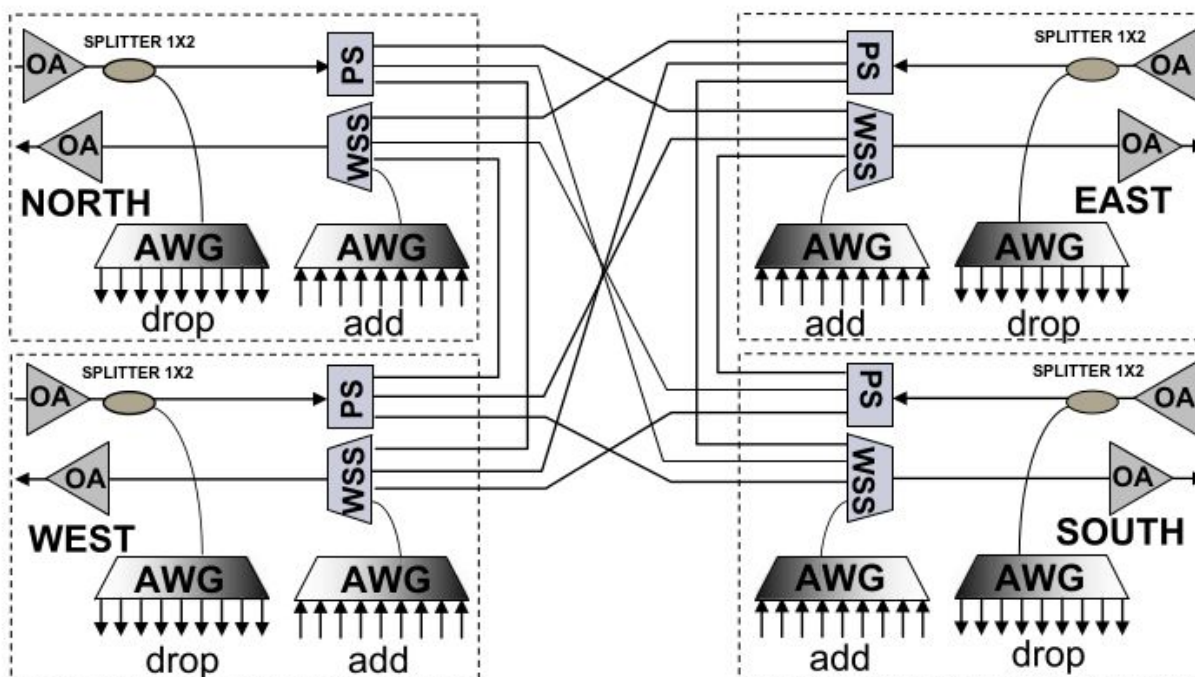


Figura 20. Exemplo de um nó ROADM grau-4 baseado em WSS e colored add-drop. [2]

Como pode ser notado na Figura 20, o componente WSS é posicionado imediatamente anterior à porta de saída. Os sinais que chegam através da porta de entrada são inicialmente duplicados através de um *splitter* 1x2. Uma das cópias ópticas será enviada para o demultiplexador AWG de *drop*, separando o sinal em comprimentos de onda.

A cópia óptica restante passará pelo *power splitter* (PS) 1x3 e enviará cada cópia desse sinal para os outros três módulos WSS presentes em cada um dos três graus restantes do nó ROADM.

Como abordado, o componente WSS é o último módulo antes da porta de saída. Portanto, receberá três sinais ópticos provenientes das outras direções e um sinal óptico proveniente dos canais de *add*.

Esses quatro sinais ópticos passarão pelo processo de separação dos seus comprimentos de onda dentro do componente WSS. Somente aqueles comprimentos que devem sair pela direção do WSS Nx1 em questão constituirão o sinal óptico de saída.

Observa-se também que o módulo WSS Nx1 deve rotear comprimentos de onda de uma das N portas para a sua respectiva porta de saída. Portanto, com essa arquitetura, qualquer comprimento de onda que entrar por um nó pode ser roteado para a saída de um ou mais graus, sendo limitado pela condição de que um único canal de cada comprimento de onda pode sair através de cada grau do ROADM. Desta forma, a saída de cada direção do ROADM deve apresentar apenas um canal de cada comprimento de onda, evitando colisões e perdas de informações.

Finalmente, nessa arquitetura apresentada pela Figura 20, o valor de N do módulo WSS determina o número máximo de graus que o nó ROADM pode apresentar. Nesse caso, $N = 4$, trata-se de um nó ROADM grau-4, podendo apresentar menos graus também.

Para redes metropolitanas e redes de longas distâncias, é desejado nós ROADM com grau igual ou superior a 8. Contudo, em redes próximas aos usuários finais, normalmente aplica-se nós ROADM de grau-2, com o objetivo reduzir os custos com componentes WSS, ainda mantendo a granularidade e flexibilidade da rede.

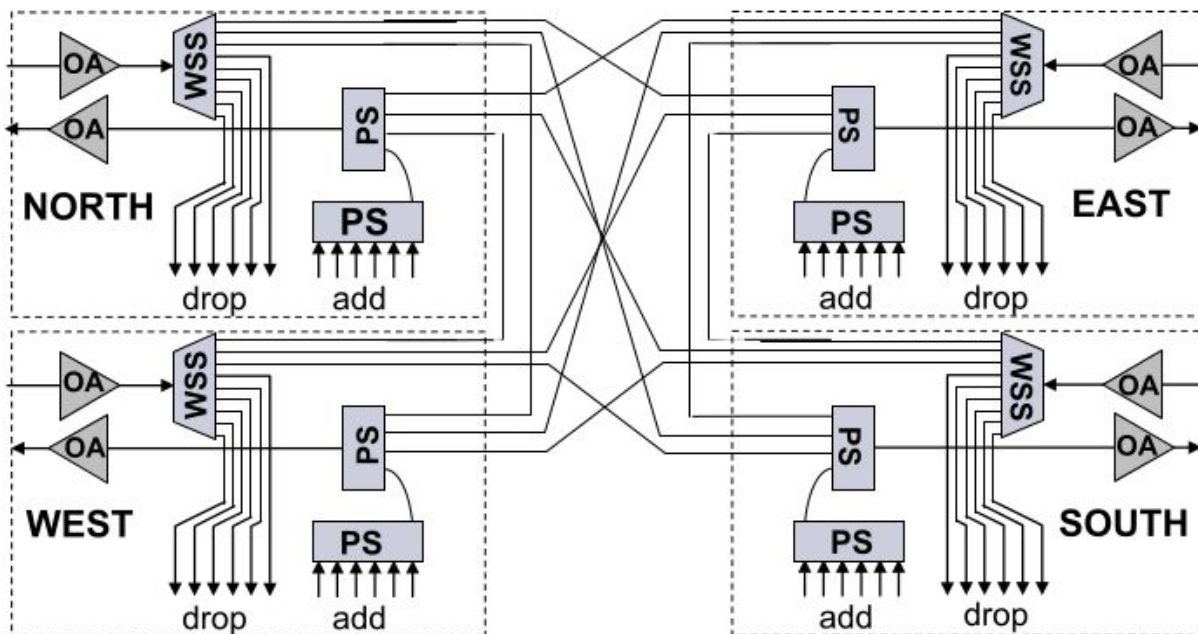


Figura 21. Exemplo de um nó ROADM grau-4 baseado em WSS e colorless add-drop. [2]

Como exposto na Figura 21, o componente WSS 1x9 é posicionado imediatamente após a porta de entrada. O sinal de entrada chega no WSS e os comprimentos de onda são separados e roteados para as respectivas portas de saída do dispositivo.

Nota-se que três das nove portas de saída do WSS são conectadas no *power splitter* 4x1 das outras direções do nó ROADM, as seis portas de saída restantes são designadas às portas de *drop*. O WSS irá rotear apenas um tipo de comprimento de onda por vez para cada uma dessas portas, podendo o WSS ser configurado para direcionar cada canal para uma porta de grau desejado ou de *drop*, ou bloquear totalmente.

Os canais que vão ser adicionados localmente (*add*) são combinados através do combinador de potência óptica (*power splitter*) Mx1 e a sua saída é conectada em uma das entradas do combinador de potência óptica (*power splitter*) Nx1. Nota-se que, para não haver colisões de comprimentos de onda e, por conseguinte, perdas de informação nesse último combinador de potência óptica, o gerenciamento do roteamento do WSS deve ser realizado via *firmware*.

Nessa arquitetura, observa-se que cada uma das portas de *drop* não está permanentemente atribuída a um comprimento de onda, cada comprimento de onda a ser removido de cada uma dessas portas é determinado pelo roteamento do WSS. O mesmo ocorre para as portas de *add*, as quais não apresentam comprimentos de onda permanentemente atribuídos. Portas de

add/drop com essa característica são conhecidas com portas “*colorless*” e são atraentes pois aumento a flexibilidade do sistema. Essa definição será melhor abordada no próximo capítulo. Portanto, o combinador de potência óptica Mx1, juntamente com o gerenciamento por *firmware*, atribui os comprimentos de onda recebidos nas M portas e forma o sinal de saída, que também será o sinal de saída da direção.

Comparando as duas arquiteturas anteriores, observa-se que ambas apresentam flexibilidade quanto ao número de graus em um nó ROADM, dependendo apenas do componente WSS e o valor de seu N. A segunda arquitetura apresenta *colorless add/drop*, o que permite que as portas *add/drop* não apresentem um comprimento de onda específico, proporcionando flexibilidade ao sistema, porém com certa complexidade, pois a colisão de comprimentos de onda deve ser gerenciada. Já a primeira arquitetura não apresenta tal flexibilidade pois suas portas *add/drop* são *colored*, ou seja, cada porta recebe um comprimento de onda específico. Todavia, essa arquitetura é mais simples e não precisa de tratamento de colisão de comprimentos de onda.

3.2.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS TRÊS COMPONENTES

Após a descrição dos três componentes ópticos (WB, PLC e WSS) e suas respectivas arquiteturas ROADM, é importante destacar a comparação entre eles e entender os motivos pelos quais se estabeleceu o componente WSS como o mais usado nas arquiteturas ROADM atuais.

O módulo WB foi a primeira solução de roteamento óptico a ser estabelecida e a mais simples. A seletividade óptica baseada no bloqueio é algo importante que é aplicável ao módulo WSS também. Contudo, sua maior desvantagem é limitar o grau de um nó ROADM para 2. Em redes próximas aos usuários, essa arquitetura ROADM grau-2 é utilizada. Entretanto, em redes metropolitanas e de longas distâncias, isso seria uma característica indesejada, por limitar o desempenho da rede.

O módulo PLC foi a segunda solução de roteamento óptico, é um pouco mais robusta do que o módulo WB, pois apresenta o controle de potência dos canais, tal característica também foi mantida no componente WSS. A desvantagem do PLC é que, por possuir filtragem repetitiva feita pelos multiplexadores e demultiplexadores AWG, apresenta redução progressiva da largura de banda disponível para cada canal. Esse módulo não consegue prover a largura de

banda necessária para cada canal, passando por 16 nós ROADMs e com espaçamento de canal de 50 GHz. Essa limitação fez com que o módulo WSS entrasse em destaque.

O módulo WSS apresenta um funcionamento similar com o do WB e introduziu o controle de potência do canais, aplicado pelo PLC. Isso tornou o WSS mais robusto que os dois anteriores, não apresentando a limitação de grau do WB e nem a limitação de largura de banda do PLC. Com o WSS, os nós ROADM podem apresentar uma quantidade de graus flexível e garante a qualidade da transmissão de canais com a largura de banda desejada e necessária.

CAPÍTULO 4: EVOLUÇÃO DA ARQUITETURA ROADM

Neste capítulo, será apresentada a evolução das arquiteturas ROADM. Toda essa evolução foi baseada no subsistema WSS, o qual permite flexibilidade e novas configurações nas arquiteturas ROADM, como será abordado.

Inicialmente, as redes eram constituídas de nós ROADM com comprimentos de onda fixo, evoluindo para ROADM do tipo CD (*colorless-directionless*), depois para ROADM do tipo CDC (*colorless-directionless-contentionless*) e, finalmente, para ROADM para redes ópticas com supercanais ou arquitetura *flexgrid*. A maior motivação da evolução foi, e sempre será, a necessidade de expansão das taxas de transmissão, as quais envolvem vários fatores de projeto em uma rede óptica, especificamente, neste caso, no sistema ROADM.

Em específico ao ROADM, a evolução foi impulsionada também pela necessidade de estabelecer dinamismo ao sistema, com a finalidade de adaptá-lo a situações transientes e inesperadas.

As características, o comportamento e o funcionamento de cada arquitetura ROADM, como também a comparação entre elas e a motivação da evolução serão apresentados nas seções seguintes do capítulo.

4.1 ROADM COM COMPRIMENTOS DE ONDA FIXOS

A arquitetura ROADM com comprimentos de onda fixos consiste na primeira geração do sistema ROADM. Basicamente, é uma arquitetura que apresenta a quantidade de canais fixa, bem como o espaçamento de canais sendo pré-definido. Como visto na seção 2.3.2, normalmente o espaçamento de canais é de 50 GHz e são utilizados 40 canais nos primeiros sistemas implantados.

Inicialmente, a indústria limitou sua abordagem em estabelecer um sistema com ênfase em sua comutação de caminho expresso (roteamento óptico) e no controle de potência de cada canal. Assim, a arquitetura WSS-ROADM, apresentada na Figura 20, se concretizou com uma implementação colorida (*colored add/drop*).

Apesar da principal vantagem do sistema ROADM sobre o sistema OADM ser a sua reconfigurabilidade, a característica *colored add/drop* proporciona limitações a essa vantagem: a presença de elementos de multiplexação e demultiplexação e de transponders de comprimentos de onda específicos inviabiliza o alcance de toda essa capacidade de flexibilidade prometida pelo sistema ROADM.

Esses elementos são capazes de receber e/ou enviar comprimentos de onda particulares, no caso do transponder, apenas um comprimento de onda específico. Assim, a partir dessa especificidade, como consequência, há também a limitação da direção: só alguns comprimentos de onda poderão ser enviados através de determinada direção, baseando-se em quais comprimentos de onda os transponders podem transmitir. [21]

Então a atribuição da cor (comprimento de onda) e do sentido ao adicionar e ao remover canais (*add/drop*) ainda requer intervenção manual. Por ser indesejado tal inflexibilidade do sistemas ROADM, estabeleceu-se a arquitetura ROADM do tipo CD (*colorless-directionless*), no qual esses problemas são solucionados. [23]

4.2 ROADM DO TIPO CD

A arquitetura ROADM do tipo *colorless* e *directionless* (sigla CD) determina que o *add/drop* de canais e as direções de entrada e de saída não estão mais permanentemente configuradas para um conjunto de comprimentos de onda específico. Apesar dos comprimentos de onda não serem mais fixos, o espaçamento de canais ainda é fixo, bem como o número de canais que são utilizados pelo sistema.

Essa nova abordagem do sistema ROADM foi alcançada através da substituição dos elementos de multiplexação e demultiplexação e dos transponders, os quais eram atrelados a um conjunto de comprimentos de onda, inviabilizando a total flexibilidade característica do ROADM, que se mostrou como evolução em relação ao sistema OADM.

Como pode ser visto nas Figuras 20 e 21, para alcançar a configuração *colorless* e *directionless*, os transponders de comprimentos de onda específicos devem ser substituídos por transponders de comprimentos de onda ajustáveis. Os multiplexadores AWG de *add* podem ser substituídos por combinadores de potências (*power splitters*) e o demultiplexadores

AWG de *drop*, por um outro módulo WSS. Dessa maneira, haverá uma configuração ROADM *colorless* e *directionless*.

Outras motivações para uma arquitetura *colorless* e *directionless*, além da viabilização da total flexibilidade do ROADM, são: a possibilidade de rápida e eficiente configuração remota de comprimentos de onda e de percursos na rede dos comprimentos de onda (pois, apesar, de toda a flexibilidade atingida, cada comprimento de onda deve identificar apenas uma rota na rede), a possível redução do número total de portas *add/drop*, proporcionando operações e interfaces físicas mais compactas e simples, a fácil manutenção, entre outras.

4.3 ROADM DO TIPO CDC

A arquitetura ROADM do tipo *colorless*, *directionless* e *contentionless* (sigla CDC) foi proposta para solucionar o problema de disputa de comprimentos de onda que surgiu a partir da utilização da arquitetura *colorless* e *directionless*.

A partir da flexibilidade alcançada no *add/drop colorless-directionless*, há a possibilidade de ocorrência de interferências nos sinais transmitidos pelo mesmo comprimento de onda, ocasionando perda de informação. Essa interferência é causada pela existência de dois canais, com mesmo comprimento de onda, chegando de várias direções em um mesmo nó. [24]

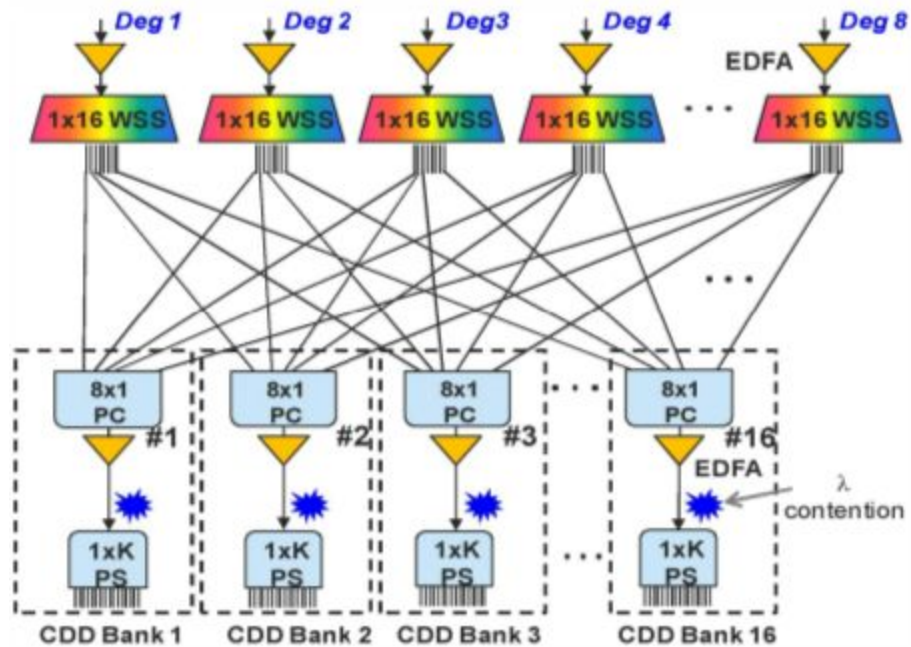


Figura 22. Exemplo de disputa de comprimento de onda em um ROADM grau-8 do tipo colorless e directionless, a partir de 16xK portas de drop. [24]

No caso da Figura 22 acima, o acoplador de potência (PC: *power coupler*) 8x1 é utilizado para coletar os comprimentos de ondas provenientes da 8 direções. Depois de cada PC, há um combinador de potência (PS: *power splitter*) 1xK. Na parte de cima, há um vetor de 8 módulos WSS 1x8, os quais são utilizados para controlar e distribuir um número limitado de comprimentos de onda para cada banco CDD (*Colorless-Directionless-Drop*).

Devido ao fato de que existem múltiplas vias sendo fundidas em apenas uma via, dentro de cada banco CDD, a disputa de comprimento de onda pode ocorrer assim como na saída do ROADM CD também pode.

A solução mais difundida é a utilização do módulo MCS (*MultiCast Switch*), o qual funciona como um *Broadcast and Select Switch* (transmitir e selecionar). Ao considerar o tráfego de um nó WSS-ROADM grau-8 (Figura 22), qualquer comprimento de onda em uma direção particular poder ser removido (*drop*) ou adicionado (*add*). Será analisado a direção de *drop*, para o *add* estabelece-se o mesmo.

Conforme um conjunto de comprimentos de onda chega de cada direção proveniente de uma camada superior de WSS (Figura 22), esses comprimentos de ondas são transmitidos e replicados através de um *power splitter* (PS) 1x16 para as 16 portas de *drop*. Em cada porta

drop, há um *switch* óptico 1x8, que serve como uma porta seletora: essa porta seleciona um comprimento de onda das 8 direções.

A partir do fato que cada *switch* óptico pode selecionar de qualquer direção um único comprimento de onda por vez, o módulo MCS mantém a configuração *directionless* já adquirida pelos módulos WSS-ROADM e alcança a característica *contentionless*, pois é impossível dois ou mais sinais apresentarem o mesmo comprimento de onda para duas ou mais direções, evitando a colisão.

Nota-se que, da mesma forma, o módulo MCS apresenta a característica *colorless*, porque não há nenhum componente na estrutura que seja dependente de comprimento de onda.

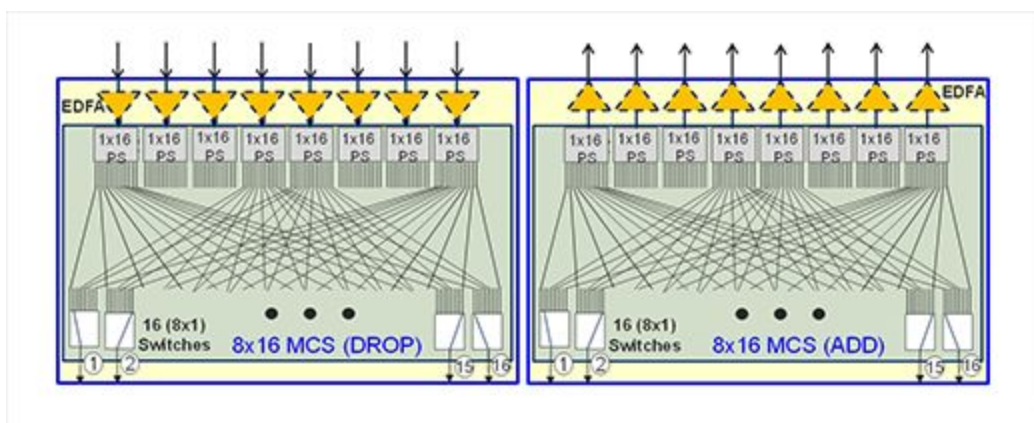


Figura 23. Módulos MCS 8x16 para drop (esquerda) e add (direita). [25]

A Figura 23 apresenta uma estrutura típica MCS MxN, em que M é o número de direções e N, o número de portas *add/drop*. Como pode ser observado também, a camada de baixo do MCS é um vetor de *switchs* ópticos, os quais normalmente são módulos PLC (abordados na seção 3.2.2) em um chip. A camada de cima é um vetor de PS 1x16. Como há uma grande perda óptica introduzida por cada módulo MCS, uma camada de EDFAs é inserida entre o WSS e a a camada de MCS, visto na Figura 24.

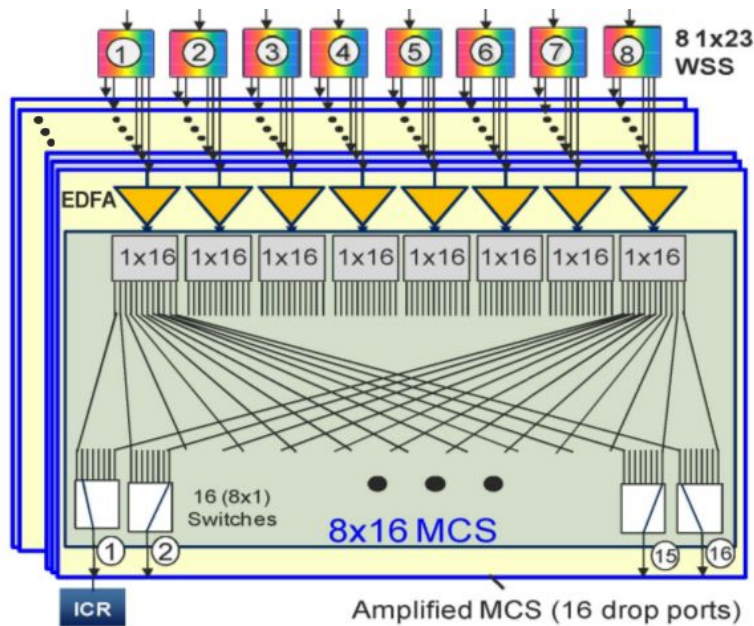


Figura 24. Uma arquitetura WSS-ROADM CDC baseada em MCSs 8x16. [25]

4.4 ROADM PARA REDES ÓPTICAS COM SUPERCANAIS

Os primeiros passos para tornar as redes mais dinâmicas e flexíveis foram as implementações das características *colorless*, *directionless* e *contentionless*, apresentadas anteriormente. Elas permitiram um grau de flexibilidade e configurabilidade maior aos sistemas ROADM com espaçamento de canal fixo (*fixed grid*).

Entretanto, com o aumento contínuo da demanda por banda, as taxas de transmissão precisaram ser elevadas para suprir a necessidade crescente do tráfego. Taxas de transmissão da ordem de 400 Gbps a 1 Tbps se tornaram plausíveis e, com elas, o espaçamento de canal de 50 GHz, aplicado nos sistemas ROADM, se tornou obsoleto.

O espaçamento de canal de 50 GHz não suporta tais taxas de transmissão. Assim, surgiu a necessidade de canais com espaçamento muito menor, da ordem de 100 GHz a 375 GHz, para viabilizar transmissões da ordem de 400 Gbps, 500 Gbps, 800 Gbps e 1 Tbps. Esses canais são denominados supercanais. [23]

Para suportar os supercanais, a arquitetura do sistema WSS-ROADM CDC precisou ser adaptada: a adoção da flexibilidade na configuração do espaçamento de canal tornou-se uma característica interessante e desejável aos novos sistemas ROADM CDC. Tal adaptabilidade representa a promessa de eficiência espectral e a habilidade para acomodar futuros formatos de modulação.

A Figura 25 mostra a comparação entre o aumento da escalabilidade dos supercanais e comprimentos de onda com espaçamento tradicional, no contexto de nós ROADM de grau-2 a grau-8.

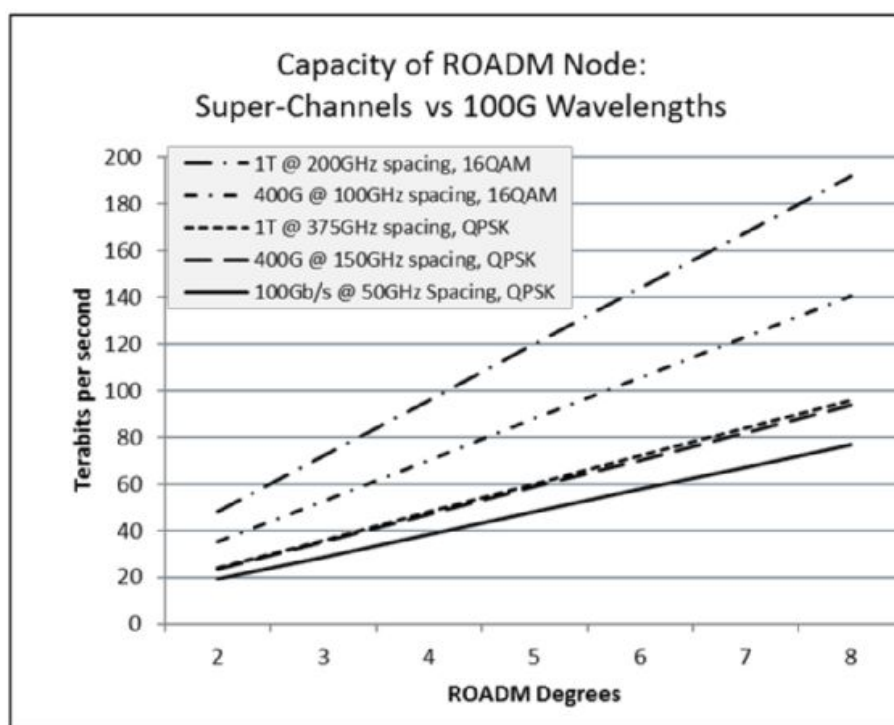
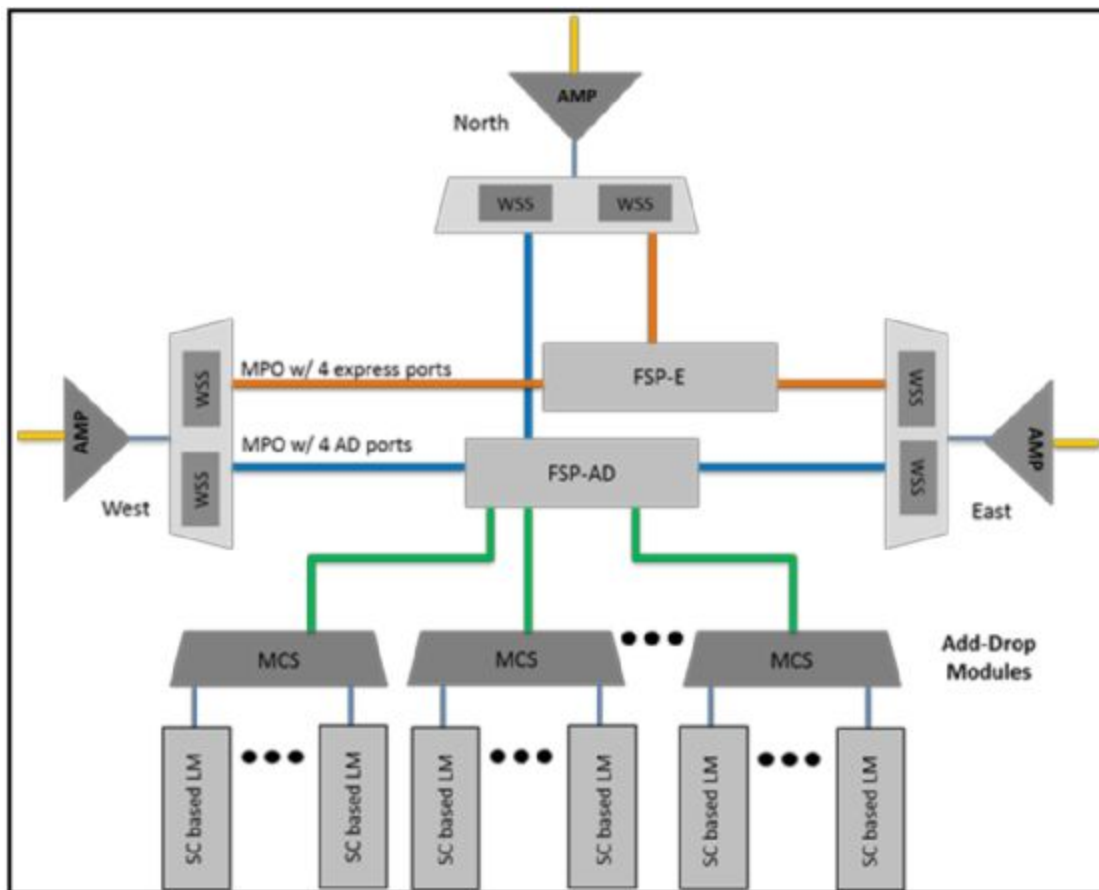


Figura 25. Escalabilidade do ROADM com supercanais. [26]

Na arquitetura WSS-ROADM CDC, apresentada na seção 4.3, há uma certa incompatibilidade com o tratamento de supercanais. A Figura 26 propõe uma arquitetura WSS-ROADM CDC com *flexgrid*, ou seja, o espaçamento de canal é configurável e flexível. Nessa abordagem “*broadcast and switch*”, visto na Figura 20, o componente *power splitter* (PS) é substituído por um módulo WSS. Deste modo, há dois WSS, um na entrada e outro na saída, proporcionando uma nova abordagem: “*route and select*” (rotear e selecionar).



Essa arquitetura resulta em uma melhor isolamento das portas, além de reduzir a perda da entrada, ocasionada pelo módulo PS e melhorar o OSNR (Relação Sinal-Ruído Óptico). O último pode ser crítico no contexto dos supercanais, os quais apresentam taxas de transmissão superiores a 100 GHz.

Essa arquitetura “*route and select*” simplifica a estrutura de *add/drop*, pois o módulo WSS de entrada pode rotear seletivamente os supercanais para serem removidos (*drop*) ou enviados aos módulos WSS restantes. Os módulos MCS proporcionam as características *colorless*, *directionless* e *contentionless* (CDC) apresentadas na seção 4.3. Portanto, a arquitetura apresentada na Figura 26 fornece uma grade de canais flexível, *colorless*, *directionless* e *contentionless*.

Ao comparar supercanais de 500GHz e canais de 100GHz, na Figura 27, observa-se que o número de módulos de linha de supercanais que precisam ser implantados é significativamente menor que os módulos de linha de canais de 100GHz. A partir da Figura 28, nota-se que o

número de elementos que compõem o sistema ROADM no cenário dos supercanais é menor do que no cenários dos canais tradicionais. Logo, supercanais reduzem a complexidade operacional da rede, com menos módulos, o tempo gasto com instalação e com manutenção é menor, melhorando a confiabilidade. [26]

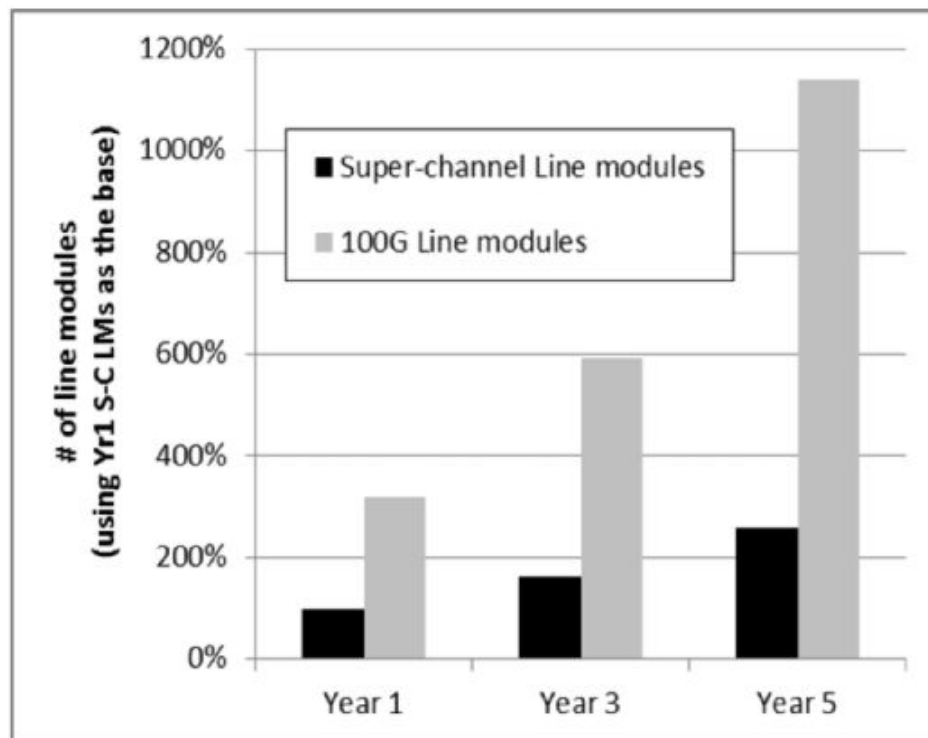


Figura 27. Número de supercanais vs. número de canais 100 GHz por ano. [26]

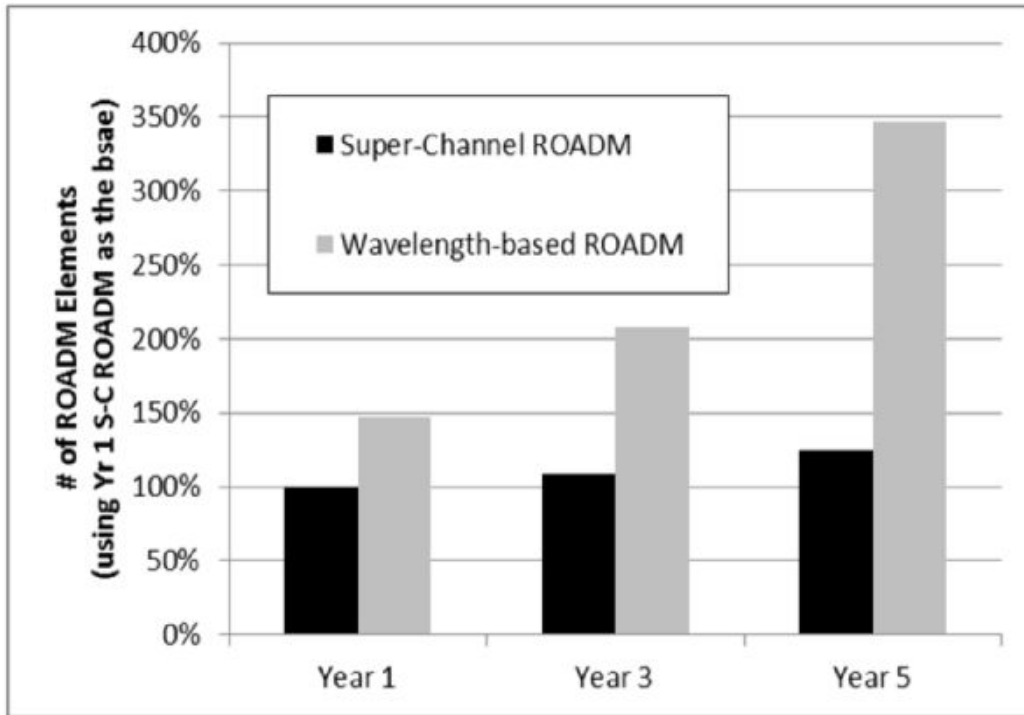


Figura 28. Número de elementos da arquitetura ROADM no cenário de supercanais e no cenário de canais tradicionais. [26]

CAPÍTULO 5: EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS

Nesse capítulo, será abordada a evolução das redes ópticas baseadas na tecnologia WDM para as redes ópticas elásticas baseadas na tecnologia OFDM, fundamentada na evolução do sistema ROADM e outros componentes das redes ópticas.

5.1 REDES ÓPTICAS E A TECNOLOGIA WDM

A combinação de múltiplos sinais ópticos em comprimentos de onda distintos transmitidos através de uma única fibra (cada comprimento de onda carregando um fluxo de informação independente) proporcionou um método economicamente atraente, cuja finalidade era aumentar ainda mais a quantidade de informação transportada por uma única fibra. [2]

Essa técnica é conhecida como multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), da sigla, em inglês, *Wavelength Division Multiplexing*. A partir do sistema ROADM, foi possível implementar o método de multiplexação WDM, sobre a qual esse sistema se baseia.

As arquiteturas ROADM iniciais, com grade fixa, aplicam essa técnica, permitindo que a capacidade total da largura de banda de uma única fibra possibilitasse o aumento da taxa de transmissão de 150 Mbps para uma capacidade de transmissão de até 100 Gbps.

Mesmo com essa expansão, a limitação de alocação de espectro e da eficiência espectral, a partir da determinação de um espaçamento de canal fixo de 50 GHz (ITU-T), fez com que essas redes ópticas não acompanhassem o significativo aumento no tráfego de informações na rede mundial. Assim, surgiu um outro paradigma de rede: as redes ópticas elásticas, apresentadas na seção 5.2 a seguir. [27]

5.2 REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS E A TECNOLOGIA OFDM

Como abordado anteriormente, as redes ópticas estão passando por mudanças significativas, impulsionadas pelo crescimento exponencial do tráfego de informações devido aos diversos serviços de multimídia. [27] Essas mudanças são embasadas sobre três características fundamentais, as quais definem a rede óptica, seu comportamento e serviços fornecidos: a técnica de multiplexação, o formato de modulação e o sistema de roteamento óptico (ROADM). Como a definição de espaçamento de canal fixo em 50 GHz não era mais capaz de atender às novas demandas de transmissão, pois ela limita a alocação espectral e inviabiliza a eficiência espectral, foram aplicadas outras técnicas que permitem maiores taxas de transmissão e flexibilidade a rede.

Houve a substituição de formatos de modulação simples, os quais suportam taxas de transmissão de 10 Gbps, por formatos de modulação muito mais sofisticados, que suportam taxas superiores a 100 Gbps, como exemplo a modulação do tipo 16-QAM (seção 2.2.3).

Concomitantemente, a técnica de multiplexação OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) também começou a ser utilizada para obter maiores taxas. Esse método de multiplexação consiste em uma tecnologia de transmissão multi-portadora que transmite um fluxo de dado de alta velocidade, dividindo-o em várias subportadoras ortogonais moduladas a taxas mais baixas. OFDM oferece vantagens como flexibilidade na alocação espectral, alta eficiência espectral, robustez contra interferência entre símbolos e entre portadoras e adaptabilidade às condições do canal. [28]

Assim, para suportar esse tipo de multiplexação, foi necessário a modificação e a adequação do sistema ROADM para se adaptar a realidade de alocação espectral flexível proporcionada pelo OFDM. Então, a arquitetura ROADM *flexgrid* foi desenvolvida para possibilitar a flexibilidade do espaçamento de canal.

Nesse cenário, é definido um novo paradigma de rede óptica, a rede óptica elástica, cujo objetivo é promover transporte espectral eficiente de dados (eficiência espectral) e flexibilidade da alocação do espectro por meio da introdução de algoritmos de roteamento flexível e granular no domínio óptico. [29]

A grande desvantagem dessa rede é que ela requer projetos de *hardware* e de *software* mais complexos para lidar com a flexibilidade e reconfigurabilidade em tempo real, para isso

hardwares mais sofisticados, como o sistema ROADM *flexgrid*, e *softwares* baseados em algoritmos RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) deverão ser aplicados. [28]

CAPÍTULO 6: CONCLUSÃO

O tráfego da Internet na rede mundial irá triplicar até 2019, quando atingir o recorde projetado de 2 zettabytes (1 zettabyte é igual a 1 trilhão de gigabyte). Os fatores responsáveis por esse crescimento são o aumento significativo de usuários da Internet em nível mundial, conexões entre máquinas, a expansão do uso de dispositivos pessoais e a adoção de serviços de vídeos avançados, computação em nuvem, dentre outros. [30]

A tecnologia de redes ópticas com roteamento de comprimento de onda amadureceu e atualmente é a forma mais apropriada para suportar a crescente demanda de tráfego. Nessas redes, o tráfego é roteado inteiramente no domínio óptico mediante o uso da multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM). [31]

Houve a evolução dos subsistemas ROADM a partir dos módulos WB, passando por PLCs e chegando na tecnologia mais atual do WSS. A partir de então, a evolução da arquitetura ROADM baseou-se na tecnologia WSS, a qual permite um número maior de direções em um nó ROADM.

A arquitetura ROADM-WSS se desenvolveu propulsionada pela demanda de transmissão, baseando-se em uma abordagem com grade fixa de comprimentos de onda (*fixed grid*). Características como *colorless*, *directionless* e *contentionless* foram adquiridas com o tempo, buscando a flexibilidade e reconfigurabilidade prometida pelo sistema ROADM.

Recentemente, a abordagem da arquitetura ROADM com grade fixa de comprimentos de onda, tendo o espaçamento de canal fixo em 50 GHz, se tornou obsoleta com os emergentes supercanais. Nesse novo cenário, a arquitetura ROADM *fixed grid* inviabilizou a expansão da taxa de transmissão, proporcionando limites da alocação espectral e da eficiência espectral.

Com os supercanais, surgiu a necessidade de uma arquitetura ROADM sem a grade fixa de comprimentos de onda e na qual o gerenciamento e os elementos da rede darão suporte para que a largura de banda dos caminhos ópticos seja flexível, ou seja, possa expandir-se e contrair-se livremente de acordo com o volume de tráfego e as requisições do usuário. [31]

Dessa maneira, toda a infraestrutura da rede óptica precisou se alterar e se adaptar ao novo contexto dos supercanais e da flexibilidade da largura de banda. Métodos de modulação e de multiplexação mais eficientes entraram em cena. A técnica de multiplexação OFDM juntamente com a modulação 16-QAM começaram a ser implementadas e definiram um novo paradigma

das redes ópticas: as redes ópticas elásticas. Nelas, o espectro da fibra é tratado como um recurso contínuo, possibilitando uma maior compactação e eficiência no uso do mesmo, através de fragmentação e defragmentação espectral. [31]

Portanto, a contínua e árdua busca por uma rede óptica flexível, que seja independente de taxa de transmissão e que possibilite qualquer aumento da mesma, foi concretizada com a arquitetura ROADM *flexgrid* e gerado no cenário das redes ópticas elásticas.

É esperado que esse modelo, por fim concebido, seja apto a se adaptar a qualquer tipo de demanda, acompanhando toda a expansão do tráfego de rede mundial que está por vir num futuro de médio e longo prazos, oferecendo serviços e transmissões de qualidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ROUSE, M. **ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) definition**. Publicado em 2007. Disponível em: <http://searchtelecom.techtarget.com/definition/ROADM-reconfigurable-optical-add-drop-multiplexer>. Acessado em 22 de outubro de 2015.
- [2] SRIVASTARA, A. ZYSKING, J. **Optically Amplified WDM Networks**. Primeira edição. EUA: Elsevier, 2011. 464 p.
- [3] ISHII, Y. NAOKI, O. SAHARA, A. HADAMA, K. **WSS Module Technology for Advanced ROADM**. NTT Technical Review. Disponível em <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201401fa7.html>. Acessado em 17 de setembro de 2015.
- [4] SMITH, D. W. **Optical Network Technology**. Telecommunications Series. Primeira edição. Londres: Chapman and Hall, 1995. 330 p.
- [5] BROWN, M. **Pioneer of optical communications**. The Sydney Morning Herald. Publicado em agosto de 2011. Disponível em <http://www.smh.com.au/comment/obituaries/pioneer-of-optical-communications-20110810-1imrc.html>. Acessado em 4 de agosto de 2015.
- [6] NOBEL COMMITTEE FOR PHYSICS. **The Nobel Prize in Physics 2009**. The Royal Swedish Academy of Sciences. Adaptado por Nobelprize.org. Publicado em 2009. Disponível em http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/illpres.html. Acessado em 4 de agosto de 2015.
- [7] KAO, K. C. HOCKHAM, G. A. **Dielectric fibre surface waveguides at optical frequencies**. University of British Columbia, junho de 1986.
- [8] SMITH, D. W. **Optical Network Technology**. Telecommunications Series. Primeira edição. Londres: Chapman and Hall, 1995. 330 p.
- [9] **Telecomunicações na web**. Telcon. Disponível em <http://www.telcon.com.br/telcon/web/Perguntas/Default.aspx?idper=S10091512030953>. Acessado em 15 de setembro de 2015.

- [10] HAMANN, R. **Como funciona a fibra óptica [infográfico]**. Tecmundo. Publicado em abril de 2009. Disponível em <http://www.tecmundo.com.br/infografico/9862-como-funciona-a-fibra-otica-infografico-.htm>. Acessado em 15 de setembro de 2015.
- [11] **Fibra óptica**. Wikipédia, a Enciclopédia livre. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Fibra_%C3%B3ptica. Acessado em 15 de setembro de 2015.
- [12] TOFFOLI, L. **Fibra óptica**. InfoEscola, navegando e aprendendo. Disponível em <http://www.infoescola.com/fisica/fibra-optica/>. Acessado em 15 de setembro de 2015.
- [13] MATA, A. **O que é fibra óptica e como funciona?** Oficina da Net. Publicado em maio de 2011. Disponível em <https://www.oficinadanet.com.br/artigo/redes/o-que-e-fibra-otica-e-como-funciona>. Acessado em 15 de setembro de 2015.
- [14] RODRIGUEZ, A. **Historia de la fibra óptica (II)**. Cablesyconectoreshoy.com. Publicado em fevereiro de 2012. Disponível em <http://www.cablesyconectoreshoy.com/historia-de-la-fibra-optica-ii/>. Acessado em 15 de setembro de 2015.
- [15] **Phase-shift keying**. Wikipédia, a Enciclopédia livre. Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying. Acessado em 24 de setembro de 2015.
- [16] **Digital modulation: Phase shift keying (PSK)**. Circuit Design, INC. Disponível em http://www.cdt21.com/resources/Modulation/modulation_PSK.asp. Acessado em 23 de setembro de 2015.
- [17] **Modulations: Pulse Modulations**. Il Mondo Delle Telecomunicazioni. Disponível em http://www.ilmondodelletelecomunicazioni.it/argomento.php?id_lezione=43&id_capitolo=286. Acessado em 24 de setembro de 2015.
- [18] POOLE, I. **What is QAM - Quadrature Amplitude Modulation**. Radio-Electronics.com. Disponível em <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/quadrature-amplitude-modulation-qam/what-is-qam-tutorial.php>. Acessado em 24 de setembro de 2015.
- [19] **Quadrature Amplitude Modulation**. Wikipédia, a Enciclopédia livre. Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_amplitude_modulation. Acessado em 24 de setembro de 2015.

- [20] POOLE, I. **Comparison of 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, 256-QAM, types of Quadrature Amplitude Modulation**. Radio-Electronics.com. Disponível em <<http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/quadrature-amplitude-modulation-qam/8qam-16qam-32qam-64qam-128qam-256qam.php>>. Acessado em 24 de setembro de 2015.
- [21] RAMASWAMI, R. SIVARAJAN, K. N. SASAKI, G. H. **Optical Networks: A Practical Perspective**. Terceira Edição. São Francisco: Morgan Kaufmann, Elsevier, 2010. 893 p.
- [22] ELDADA, L. **ROADM Architectures and Technologies for Agile Optical Networks**. Wilmington: DuPont Photonics Technologies.
- [23] ROORDA, P. COLLINGS, B. **Evolution to Colorless and Directionless ROADM Architectures**. Ottawa: JDSU, OFC/NFOEC, 2008.
- [24] WAY, Winston. **Next Generation ROADM Architectures**. San Jose: NeoPhotonics, 2012.
- [25] WAY, W. **How Does Multicast Switch Work? (Part I)**. NeoPhotonics. Publicado em agosto de 2015. Disponível em <<http://blog.neophotonics.com/how-does-multicast-switch-work-part-i/>>. Acessado em 28 de setembro de 2015.
- [26] MALIK, A. WAUFORD, W. PAN, Z. GOEL, N. K. HAND, S. MITCHELL, M. **Implications of Super-Channels on Colorless, Directionless and Contentionless (CDC) ROADM Architectures**. Califórnia: Infinera Corporation, 2014.
- [27] GERSTEL, O. et al. **Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?**. *Communications Magazine*, IEEE, fevereiro de 2012.
- [28] PEREIRA, P. M. **Redes Ópticas Elásticas**. São Carlos: Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Computação, USP, 2013.
- [29] JINNO, M. et al. **Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies**. *Communications Magazine*, IEEE, novembro de 2009.
- [30] JOSE, K. S. **Cisco Visual Networking Index Predicts IP Traffic to Triple from 2014-2019; Growth Drivers Include Increasing Mobile Access, Demand for Video Services**. CISCO, *the network*. Publicado em maio de 2015. Disponível em <<http://newsroom.cisco.com/press-release-content?type=webcontent&articleId=1644203>>. Acessado em 27 de outubro de 2015.
- [31] QUEIROZ, Igor. ASSIS, Karcus. **Redes Ópticas Elásticas: Planejamento e Otimização**. Salvador: Departamento de Engenharia Elétrica, UFBA, 2011.

ANEXOS

ANEXO A - *DATASHEET* DO PRODUTO ROADM WSS PADTEC

É apresentado o conteúdo de uma folha de informações sobre o produto ROADM WSS de uma empresa brasileira.



O ROADM da **Padtec** prov uma melhor distribuiç o dos recursos da rede ao alocar dinamicamente serviç os pticos como TDM, Ethernet e dados, tornando a rede mais din mica e flex vel.

O ROADM **WSS** da **Padtec** suporta as caracter sticas de flexibilidade demandadas por redes em malhas, permitindo escalabilidade e evoluç o modular do sistema at grau 9. O ROADM **WSS** a soluç o *state-of-the-art* da **Padtec** para funcionalidades de adiç o, derivaç o e roteamento de canais em n s estrat gicos.

A crescente demanda por serviç os *broadband*, *video on-demand* e n o-interrupç o de tr fego est direcionando o desenvolvimento das redes DWDM em suas aplicaç es metropolitanas e de acesso. Para se obter escalabilidade e capacidade nos n s de rede com custo efetivo, funcionalidades como adiç o e extraç o de canais em n s estrat gicos da rede s o mandat rias.

Redes DWDM din micas e reconfigur veis baseadas em ROADMs (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers*) eliminam as dificuldades associadas st cnicas de networking nas redes DWDM legadas. Os ROADMs disponibilizam um mecanismo autom tico para adicionar capacidade s redes, de maneira flex vel e sem a necessidade de interromper o serviç o para upgrades baseados no empilhamento de sistemas.



A fam lia de ROADMs da Plataforma **LightPad i6400G**, composta pelos modelos **WSS-20**, **WSS-50** e **WSS-90**, possibilita aos administradores da rede selecionar, via software de gerenciamento, quais canais DWDM ser o adicionados, extra dos ou redirecionados em um determinado n de rede. Os ROADMs da Padtec s o soluç es de networking inteligente para provedores de serviç o em redes regionais, metropolitanas, *Long-Haul* e *Ultra Long-Haul* que demandam por dinamismo e flexibilidade. O ROADM aloca dinamicamente serviç os pticos TDM, Ethernet e de dados, em diversas taxas, agilizando a adaptaç o da rede variaç es no perfil de tr fego.



Os ROADMs da Plataforma LightPad i6400G permitem a adição/derivação/passagem dinâmica de comprimentos de onda, sem a necessidade de intervenção manual.

O controle automático de ganho dos amplificadores e a equalização automática e dinâmica dos módulos WSS garantem a otimização da potência transmitida em cada comprimento de onda, dispensando ajustes manuais.

O sistema de ROADMs WSS da Padtec possibilita aceleração significativa do tempo de estabelecimento de conexão e eliminação de fontes potenciais de erro humano. O monitoramento contínuo da potência de cada canal permite a localização rápida e efetiva de falhas.

Unidades do Sistema WSS

- WSS-20: sites de duas direções com custo reduzido
- WSS-50: sites de até 5 direções
- WSS-90: sites de até 9 direções
- OCM (Optical Channel Monitoring): responsável por adquirir amostras de potência por canal

Características WSS

- Solução totalmente alinhada com os requisitos das novas gerações de redes ópticas de longo alcance e metropolitanas
- Funcionalidades de adição/derivação/comutação de até 80 canais
- Facilidade no gerenciamento da rede e rápido provisionamento de caminhos ópticos (*bandwidth on demand*) viabiliza diminuição de OPEX
- Arquitetura modular: sistemas flexíveis de fácil upgrade do grau 2 até grau 9
- Permite operação em modo *colorless* e *directionless*
- Funcionalidade de loopback para testes sistêmicos
- Suporta topologias de redes em malha, lineares e anel
- Baixo consumo e unidade de ventilação dedicada

Interfaces Clientes

- Transparente ao protocolo e taxa de transmissão
- Compatível com taxas OTU3/OTU3e
- Suporte a demais taxas STM, Ethernet, ISDB, HDTV, ESCON, FICON, Fibre Channel, ETR/CLO e SDI

Proteção

- Sistema totalmente compatível com proteção O-SNCP/Y-cable, com tempo de comutação menor de 50 ms
- Mecanismo de proteção por tributário

Características ópticas

- Comprimentos de onda na banda C ou L (100 GHz ou 50 GHz)
- Baixa perda de inserção
- Monitoramento contínuo da potência de cada canal, e equalização dinâmica de potência
- Interoperável com Multiplexadores e Demultiplexadores instalados
- Compatível com Amplificadores e Transponders da família LightPad

Características de Gerência WSS

- Funcionalidades de gerência conforme ITU-T G.709
- Comunicação entre placas baseada em Ethernet



padtec.com



Informações
Tel: +55 19 2104-9700
mktproduto@padtec.com.br

Produto beneficiado pela Legislação de Inovação. A Padtec reserva-se o direito de alterar as especificações e a oferta de produtos sem aviso prévio.

ANEXO B - *DATASHEET* DO PRODUTO ROADM WSS GRAU 8 INFINERA

É apresentado o conteúdo de uma folha de informações sobre o produto ROADM WSS da empresa americana Infinera.

1x8 ROADM/50GHz

Multi-degree ROADM for flexible optical networks

Key benefits:

- Creates the ability to add/drop any wavelength from/to any port giving maximum flexibility in wavelength allocation
- Dynamic selection of add-drop wavelengths per port enables hitless topology changes
- Built-in Variable Optical Attenuator (VOA) for easier channel power balancing
- 8 individual add-drop ports enables multidimensional nodes
- Compact design, giving small footprint
- Fully integrated with TM-Series and Transmode Network Manager
- Can be installed in existing TM-chassis and networks
- Low Power Design ensures low total cost of ownership

The 1x8 ROADM is a powerful part of Transmode's TM-Series platform enabling optimized and cost efficient high capacity transport networks based on DWDM technology.

Optimized for dynamic network applications

The 1x8 ROADM is a compact solution for all network topologies aiming for a future proof dynamic traffic design, with hitless changes in wavelength routing. The 1x8 ROADM unit - fully supported as a plug-in unit in the TM-3000 chassis - works as a building block for reconfigurable add-drop nodes of up to 8 dimensions.

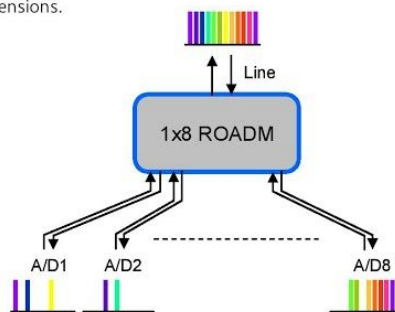


Fig. 1 Schematic principle of 1x8 ROADM add-drop function

The 1x8 ROADM has 8 individual add-drop ports. The add ports use a Wavelength Selective Switch (WSS) to dynamically select which of the 80 DWDM channels on the ITU-T 50GHz C-band grid can be added to the line signal for each add port. An Optical Coupler is used to distribute the incoming line signal to the drop ports. One of the drop ports has a lower optical loss, optimized for the local drop. A DWDM add-drop filter or Mux/Demux unit is always used for locally terminating traffic.

The 1x8 ROADM includes Variable Optical Attenuator (VOA) functionality on all wavelengths added to the line signal. This facilitates channel power balancing in amplified networks.



Grouping of ports on different units can be done in the node management software to enable the setting of identical channel selection. Also restrictions on channel selection can be made on individual or grouped ports to simplify commissioning and minimize the risk for faulty handling.

Multi-dimensional node applications

The 8 individual add-drop ports of the 1x8 ROADM enable hitless redirection of traffic in multi-dimensional nodes. By grouping up to 8 units and interconnecting the add-drop ports, up to 8-dimensional nodes can be created, where traffic from any line can be directed to any other line or be locally dropped. A 50GHz compatible Mux/Demux is used to separate the terminated channels.

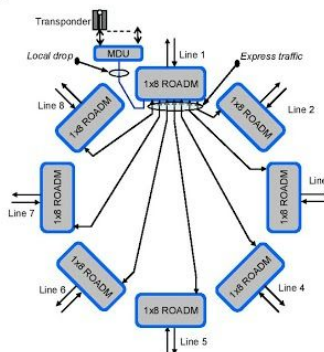


Fig. 2 8-dimensional node. Full connections only shown for Line 1

It is possible to create directionless nodes using an extra 1x8 ROADM unit to direct the local traffic to the preferred line fiber. Each wavelength can be directed as required on an individual basis. It is possible to have both fixed and directionless AD in the node.

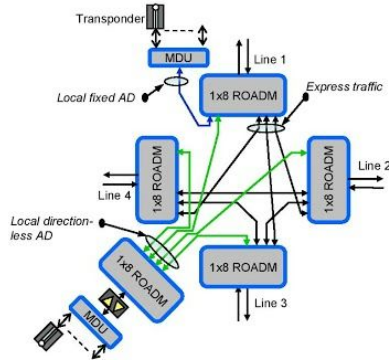


Fig. 3 A 4-dimensional node with both fixed and directionless traffic

Linear add-drop applications

For ring and bus network structures the 1x8 ROADM enables dynamic add-drop nodes with 2-dimensional east- and westbound traffic by pairing two units and connecting them via one of the add-drop ports for the express traffic.

Initially, locally terminating traffic could be allocated to one of the add-drop ports, keeping the remaining ports for traffic upgrades or for scaling into multidimensional nodes

Low Power Design

A 1x8 ROADM consumes less than 6W. Low power consumption in combination with a small footprint reduces site costs and enables more capacity to be handled at sites with restrictions on power consumption, cooling and space.

The 1x8 ROADM can be mounted in a TM-3000 chassis where it occupies 2 full-size slots.

Technical specifications:

Software release 15.0 or later

Insertion loss (see figure)	Add [A/D Rx] - [Line Tx] : 7.0 dB Drop [Line Rx] - [A/D 8, Local A/D, Tx] : 5.9dB Drop [Line Rx] - [A/D 1-7 Tx] : 12.3 dB	
Range	80 channels on 50GHz ITU-T C-band grid	
Add ports	Wavelength Selective Switch (WSS)	
Drop ports	Passive Optical Coupler	
Line side features	Variable Optical Attenuator (VOA) functionality on all individual wavelengths	
No of add/drop ports	8	
Switching time	Max 250ms	
VOA	Range: 0 ~ 15dB Step size: 0.1dB	
Dimensions	Occupies two full-size slots in a TM-3000 chassis	
Power consumption	6W	

DS_TM_1x8 ROADM_B

The specifications and information within this document are subject to change without further notice. All statements, information and recommendations are believed to be accurate but are presented without warranty of any kind. Contact Transmode for more details.

www.transmode.com

TRANSMODE IS NOW PART OF
infinera

transmode