

**Pedro Morey Pereira**

# **Redes Ópticas Elásticas**

São Carlos

2013

**Pedro Morey Pereira**

# **Redes Ópticas Elásticas**

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

Curso de Engenharia de Computação

ORIENTADORA: Mônica Lacerda Rocha

São Carlos

2013

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.

P436r           Pereira, Pedro Morey  
                  Redes Ópticas Elásticas / Pedro Morey Pereira;  
                  orientadora Mônica Lacerda Rocha. São Carlos, 2013.

                  Monografia (Graduação em Engenharia de Computação)  
                  -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade  
                  de São Paulo, 2013.

                  1. Redes Ópticas Elásticas. 2. Roteamento e  
                  alocação espectral. 3. OFDM. 4. Agregação de tráfego.  
                  I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nome:** Pedro Morey Pereira

**Título:** “Redes ópticas elásticas”

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido em** 02/12/2013

**Comissão Julgadora:**

**Resultado:**

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

Aprovado

Mestre Arturo Miranda Vera  
(Doutorando - SEL/EESC/USP)

Aprovado

Mestre Laís Lemos de Oliveira Basílio  
(Doutoranda - SEL/EESC/USP)

Aprovado

**Coordenador pela EESC/USP do Curso de Engenharia de Computação:**

Prof. Associado Evandro Luís Linhari Rodrigues

## **Dedicatória**

À minha família, por me incentivar e me apoiar.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Ana Beatriz Costa Rodrigues Alves por colaborar na revisão desta monografia e por me apoiar e ter suportado tantos anos de distância.

Aos meus amigos: Ciro, Elias, Russi, Maziero, Gio, Natássya, Bruno e Falqueto, que me acompanharam durante os últimos anos.

A minha orientadora Mônica pelos conselhos e paciência durante minha graduação.

## Resumo

As redes ópticas estão passando por diversas mudanças devido ao rápido crescimento do tráfego ocasionado pelos serviços multimídia e pelas incertezas quanto à previsão de onde o tráfego se originará. Assim, as redes ópticas devem evoluir para suprir estas demandas, de modo que a taxa de dados e a alocação espectral sejam flexíveis, proporcionando flexibilidade e escalabilidade às novas redes, chamadas de redes ópticas elásticas. Neste trabalho é realizada uma revisão bibliográfica na qual são estudadas as tecnologias que podem permitir a substituição do padrão 10 Gb/s por uma rede cujo paradigma é prover uma grade espectral flexível e adaptável às condições da rede e da demanda por serviços. Foi estudada a tecnologia *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM), os elementos (em nível de nó e de rede) que tornarão as redes ópticas factíveis, como os *Bandwidth-Variable Transponder*, e *Wavelength Cross-Connect*, roteamento e alocação espectral, agregação de tráfego, sobrevivência da rede e controle e gerenciamento de redes. Além do estudo, foram mostrados resultados de testes com algoritmos de *grooming* em diferentes redes (pequenas e grandes).

Palavras-chave: redes ópticas elásticas, roteamento e alocação espectral, *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*, Agregação de tráfego

## **Abstract**

Optical networks are undergoing in many changes due to the rapid growth of traffic caused by multimedia services and the uncertainties in predicting where the traffic will be originated. Thus, optical networks must evolve to meet these demands, so that the data rate and spectrum allocation could be flexible, providing flexibility and scalability to new networks, called elastic optical network. In this work we conducted a literature review in which studies the technologies that can enable the replacement of the standard 10 Gb/s over a network whose paradigm is to provide a flexible and adaptive spectral grid to network conditions and flexible demand for services. We studied the Orthogonal Frequency-Division Multiplexing technology, the elements (node and network-level) that will make feasible optical networks, such as Bandwidth-Variable Transponder, Wavelength Cross-Connect, routing and spectrum allocation, traffic grooming, network survivability, network control and management. In addition to the study, the results from tests on networks (small and large) using different grooming algorithms are shown.

Keywords: elastic optical network, routing and spectral allocation, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, traffic grooming

## Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	2
<b>CAPÍTULO 2: TECNOLOGIAS DE TRANSMISSÃO E MODULAÇÃO.....</b>	<b>3</b>
2.1. OFDM.....	3
2.1.1. Histórico.....	3
2.1.2. Conceção básica.....	3
2.1.3. Ortogonalidade.....	5
2.1.4. Técnicas.....	6
2.1.5. Diagrama de blocos.....	8
2.1.6. Vantagens e desvantagens.....	9
2.2. O-OFDM.....	9
2.2.1. Detecção direta.....	9
2.2.2. Detecção coerente.....	10
<b>CAPÍTULO 3: REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS BASEADAS EM OFDM.....</b>	<b>11</b>
3.1. CONCEITO E ARQUITETURA.....	11
3.2. BENEFÍCIOS.....	13
3.2.1. Taxa adaptativa.....	14
3.2.2. Distância adaptativa.....	14
3.3. TECNOLOGIAS EM NÍVEL DE NÓ.....	15
3.3.1. BVT.....	15
3.3.2. WXC.....	17
3.4. TECNOLOGIAS EM NÍVEL DE REDE.....	19
3.4.1. Especificação de slot de espectro flexível.....	20

3.4.2. Algoritmo RSA.....	20
3.4.3. Agregação de tráfego.....	20
3.4.4. Estratégias de sobrevivência.....	21
3.4.5. Eficiência energética.....	21
3.4.6. Esquemas de gerenciamento e controle da rede.....	21
<b>CAPÍTULO 4: AGREGAÇÃO ÓPTICA DE TRÁFEGO.....</b>	<b>23</b>
4.1. PRINCÍPIOS DE AGREGAÇÃO ÓPTICA.....	23
4.2. ALGORITMOS.....	24
4.2.1. Programação Linear Inteira (ILP).....	25
4.2.2. RSA Heurístico.....	25
4.3. EXEMPLOS DE PERFORMANCE.....	25
4.3.1. Rede pequena.....	26
4.3.2. Rede grande.....	28
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO.....</b>	<b>30</b>
5.1. CONCLUSÃO.....	30
5.2. TRABALHOS FUTUROS.....	30
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>32</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectros FDM convencional e OFDM.....	3
Figura 2 – Domínio da frequência e do tempo de um sinal OFDM: (a) Domínio da frequência; (b) Domínio do tempo.....	4
Figura 3 – Diagrama conceitual de um sistema de modulação multi-portadora.....	5
Figura 4 – Intervalo de guarda em um símbolo OFDM.....	7
Figura 5 – Sinal OFDM com prefixo cíclico.....	7
Figura 6 – Diagrama de blocos de um sistema OFDM.....	8
Figura 7 – Arquitetura de uma rede óptica elástica.....	12
Figura 8 – Transceivers com 3 demandas: a) Fixo; b) Flexível.....	12
Figura 9 – a) Grid fixo; b) Supercanal; c) 5 demandas com suas necessidades espectrais; d) 5 demandas moduladas adaptativamente; e) 5 demandas com espectro flexível.....	13
Figura 10 – Variação da taxa de transmissão/Largura de banda através do ajuste do número de subportadoras.....	16
Figura 11 – Conceito de BV-WSS.....	17
Figura 12 – Arquitetura de um WXC: a) difusão e seleção; b) não difusão e seleção....	19
Figura 13 – Agregação óptica em redes ópticas elásticas.....	23
Figura 14 - Estrutura de um XC para difusão e seleção.....	24
Figura 15 – Rede de pequenas dimensões, 5 nós.....	26
Figura 16 – Economia de transmissores na rede com 5 nós.....	27
Figura 17 – Total de índices na rede com 5 nós.....	27
Figura 18 – Topologia da NFSnet.....	28
Figura 19 – Economia de transmissores na NSFnet.....	28
Figura 20 - Uso espectral total na NSFnet.....	29
Figura 21 - Total de índices na NSFnet.....	29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2 - Expectativa do tráfego IP [1].....	1
---	---

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Analogic Digital Converter
BVT	Bandwidth Variable Transponder
CD/PMD	Chromatic Dispersion and Polarization Mode Dispersion
CO-OFDM	Coherent Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
DAB	Digital Audio Broadcasting
DAC	Digital to Analog Converter
DDO-OFDM	Direct Detection Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
DSL	Digital Subscriber Loop
DSP	Digital Signal Processing
DVB	Digital Video Broadcasting
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier transform
HD	High Definition
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ILP	Integer Linear Programming
IPTV	Internet Protocol Television
ISI	Inter Symbol Interference
LSG	Least Spectrum Grooming
LSP	Label-Switched Path
LTE	Long-Term Evolution
MCM	Multi Carrier Modulation
MEMS	Micro-Electro Mechanical System
MTG	Minimum Transmitter Grooming
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
O-OFDM	Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OSNR	Optical Signal-To-Noise Ratio
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PB	Petabyte
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RSA	Routing and Spectrum Allocation
RWA	Routing and Wavelength Assignment
SLA	Service Level Agreement
TDM	Time Division Multiplexing
TS	Training Symbol
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WSS	Wavelength Selective Switching
WXC	Wavelength Cross Connect

# CAPITULO 1: INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

O tráfego da internet na rede mundial tem praticamente dobrado a cada dois anos e é previsto, para o ano de 2016, um tráfego global de 1,3 zettabyte (1 trilhão de gigabytes), como pode ser observado na Figura 1.

Este significativo aumento no tráfego se deve a diversos fatores, tais como: aumento no número de dispositivos móveis e de usuários de Internet, taxas de dados mais rápidas, expansão das redes Wi-Fi e crescimento no número de aplicações com comunicação por meio de vídeo em tempo real e alta definição (HD).

Tabela 1- Expectativa do tráfego IP

Tráfego IP, 2012-2017						
Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Por tipo (PB por mês)						
Internet fixa	31.339	39.295	47.987	57.609	68.878	81.818
IP corporativo	11.346	14.679	18.107	21.523	24.740	27.668
Dados móveis	885	1.578	2.798	4.704	7.437	11.157
Total	43.570	55.553	68.892	83.835	101.055	120.643

Fonte: CISCO [1].

Devido a este aumento na demanda por tráfego, as redes ópticas futuras necessitarão de sistemas de transmissão com maior capacidade e melhor relação custo-benefício. Dada a previsão acima, pode-se dizer que as redes ópticas deverão suportar tráfegos em magnitudes próximas a Tb/s por canal num futuro próximo, substituindo, possivelmente, o antigo sistema *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) com 40 Gb/s e 100 Gb/s por canal, utilizados nos *backbones* das redes.

Dimensionar as crescentes demandas por tráfego tem sido um desafio para a tecnologia de transmissão óptica convencional devido ao gargalo da largura de banda elétrica e às deficiências intrínsecas que se tornam mais severas à medida que a velocidade de transmissão aumenta. Outro desafio é prever mudanças na demanda por largura de banda e padrões geográficos de tráfego, ocasionadas, por exemplo, por tecnologias recentes como vídeo sob demanda, computação nas nuvens e *grid* e *Internet Protocol Television* (IPTV) [2].

Para superar esses desafios e atender às necessidades da Internet futura, a transmissão óptica e tecnologias de rede estão evoluindo para se tornarem mais eficientes, flexíveis e redimensionáveis. Diversas soluções têm sido estudadas nos últimos anos e, dentre estas, a *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) é

uma das tecnologias que tem se mostrado mais promissora para transmissão óptica de alta velocidade.

OFDM é uma tecnologia de transmissão multi-portadora que transmite um fluxo de dados de alta velocidade, dividindo-o em várias subportadoras ortogonais de mais baixa velocidade. Oferece vantagens como alta eficiência de espectro, robustez contra interferência entre símbolos e entre portadoras e adaptabilidade às condições do canal. Estas vantagens são essenciais para a futura transmissão óptica de alta velocidade. Surgiu pela primeira vez como uma tecnologia de camada física em comunicações sem fio e é amplamente adotada em padrões de rede de banda larga com e sem fio, tais como 802.11a / g Wi-Fi, 802.16 WiMAX, *Long-Term Evolution* (LTE), *Digital Audio Broadcasting* e *Digital Video Broadcasting* (DAB e DVB) e *Digital Subscriber Loop* (DSL) em todo o mundo [3].

Baseada na tecnologia OFDM óptica (O-OFDM), uma nova arquitetura de rede óptica elástica foi proposta, também chamada de *SLICE*, com capacidade de gerenciar sinais com taxas de dados diferentes e largura de banda variável. Ao quebrar o limite da alocação de espectro do WDM e utilizando multiplexação O-OFDM nas subportadoras, um caminho óptico de largura de banda flexível pode ser provisionado utilizando apenas espectro necessário de acordo com a taxa de dados transmitida.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade de uma nova arquitetura de redes ópticas, ditas flexíveis ou elásticas. Ou seja: estudar as tecnologias que tornarão as redes espectralmente flexíveis e os elementos da rede mais adaptáveis. Em seguida, numa visão mais abrangente, serão descritos cenários e possíveis algoritmos para roteamento e alocação de espectro.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O trabalho está dividido em 5 capítulos. Este primeiro apresenta os aspectos globais do texto, sua motivação, objetivos e a organização. No capítulo 2 serão descritas as tecnologias OFDM, O-OFDM e algumas técnicas de modulação. No capítulo 3 será dada uma visão sobre as redes ópticas elásticas e sua arquitetura, baseadas na tecnologia OFDM, e um estudo sobre as possíveis tecnologias para implementação dessa nova rede em nível de nó e de rede. No capítulo 4 serão descritos dois algoritmos de roteamento e alocação de espectro e dois cenários, a partir da adoção de um algoritmo. Finalmente, será apresentada no capítulo 5 e último a conclusão e os conhecimentos agregados por este trabalho.

## CAPITULO 2: TECNOLOGIAS DE TRANSMISSÃO E MODULAÇÃO

### 2.1. OFDM

#### 2.1.1. Histórico

A técnica de transmissão OFDM surgiu como uma evolução da técnica convencional de *Frequency Division Multiplexing* (FDM) na qual, ao invés de se utilizar bandas de guarda para a separação das subportadoras na recepção do sinal, trabalha-se com uma particular sobreposição espectral de subportadoras, como pode ser observado na Figura 2. Além disso, é possível obter uma economia de banda em relação à técnica FDM convencional. Um sistema OFDM foi inicialmente proposto em 1968 [4] e patenteado nos Estados Unidos em 1970 [5]. A primeira avaliação da aplicação da técnica OFDM para comunicações móveis foi apresentada em 1985 [6]. Esta técnica vem desde então sendo particularmente considerada para ser empregada em radiodifusão, em transmissão digital sobre linhas de telefone e em redes locais sem fio.

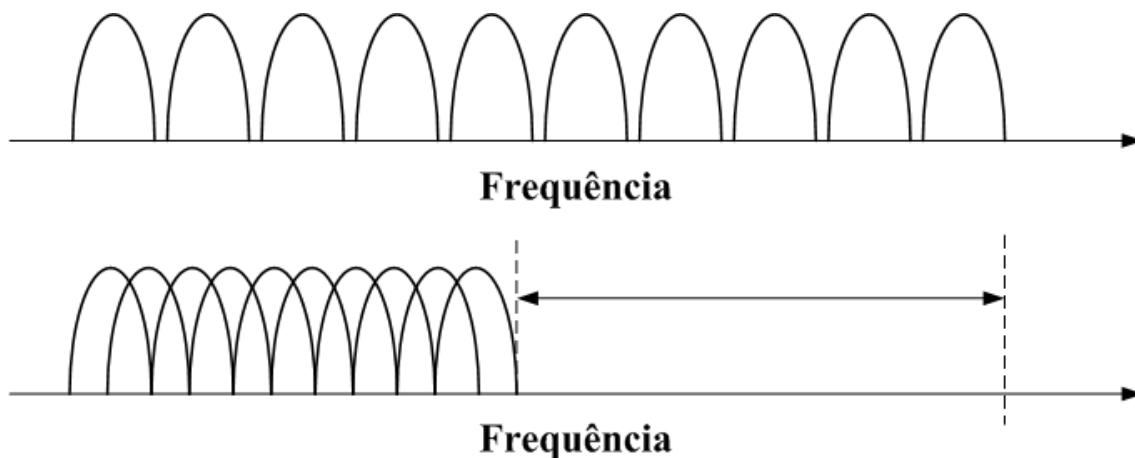


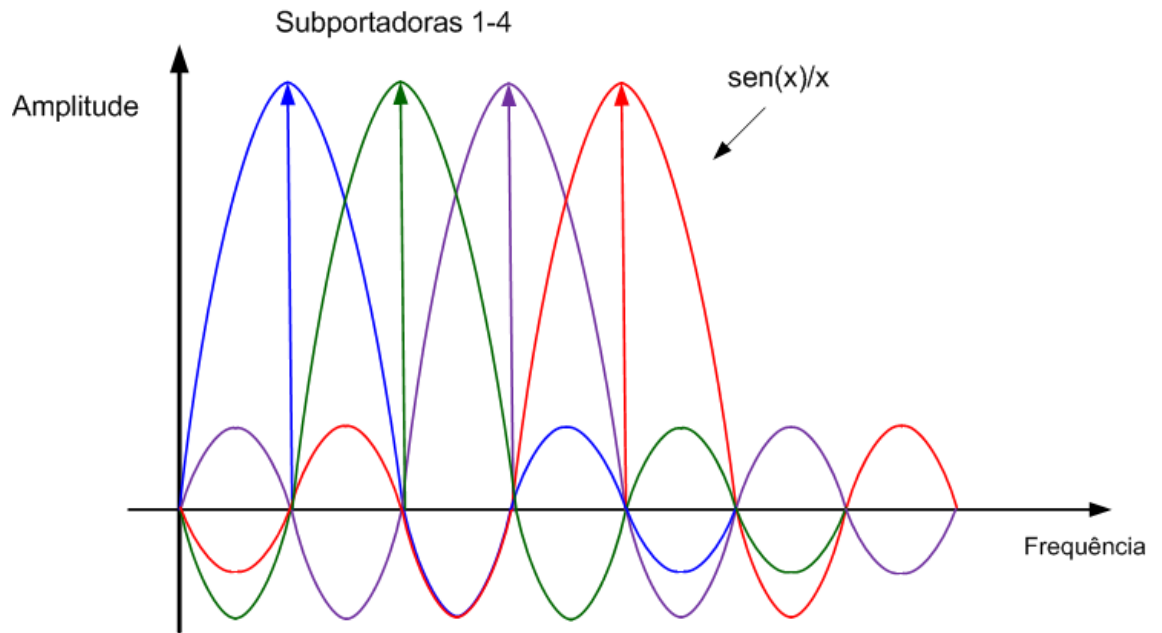
Figura 1- Espectros FDM convencional e OFDM

#### 2.1.2. Concepção básica

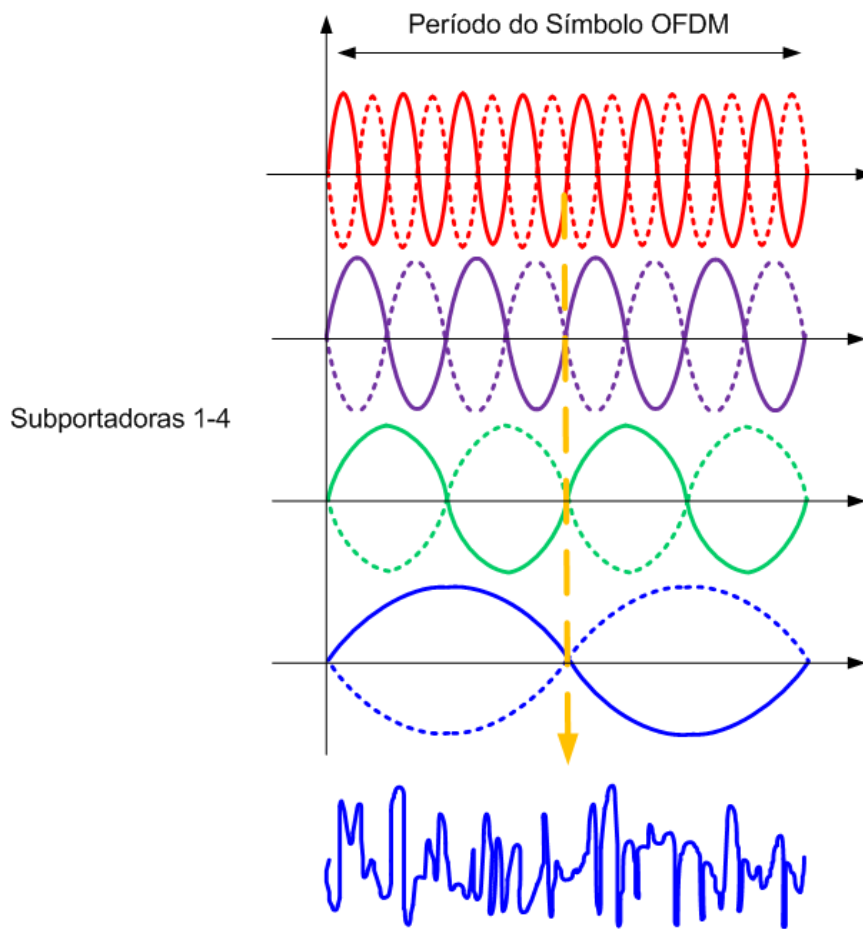
A técnica OFDM consiste na transmissão paralela de dados em diversas subportadoras com modulação QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) ou PSK (*Phase Shift Keying*) e taxas de transmissão por subportadoras tão baixas quanto maior o número destas empregadas. Uma ilustração dessas subportadoras pode ser vista na Figura 3 (a). Reduzir essa taxa, ou seja, aumentar a duração dos símbolos transmitidos em cada subportadora implica diminuir a dispersão no tempo ou interferência entre símbolos (ISI). A ISI ocorre quando um símbolo transmitido interfere no seu vizinho.

Num sistema OFDM, o espaçamento entre subportadoras é cuidadosamente selecionado de forma que cada subportadora seja alocada em pontos de cruzamento

de zero do espectro das demais, o que também pode ser observado na Figura 3 (a). O sinal no domínio do tempo pode ser observado na Figura 3 (b).



(a)



(b)

Figura 2 - Domínio da frequência e do tempo de um sinal OFDM: (a) Domínio da frequência; (b) Domínio do tempo [2]

### 2.1.3. Ortogonalidade

OFDM é uma classe especial de modulação multi-portadora (MCM). Uma implementação genérica pode ser vista na Figura 4 e logo abaixo um modulador/demodulador do tipo *IQ in phase/quadrature phase*.

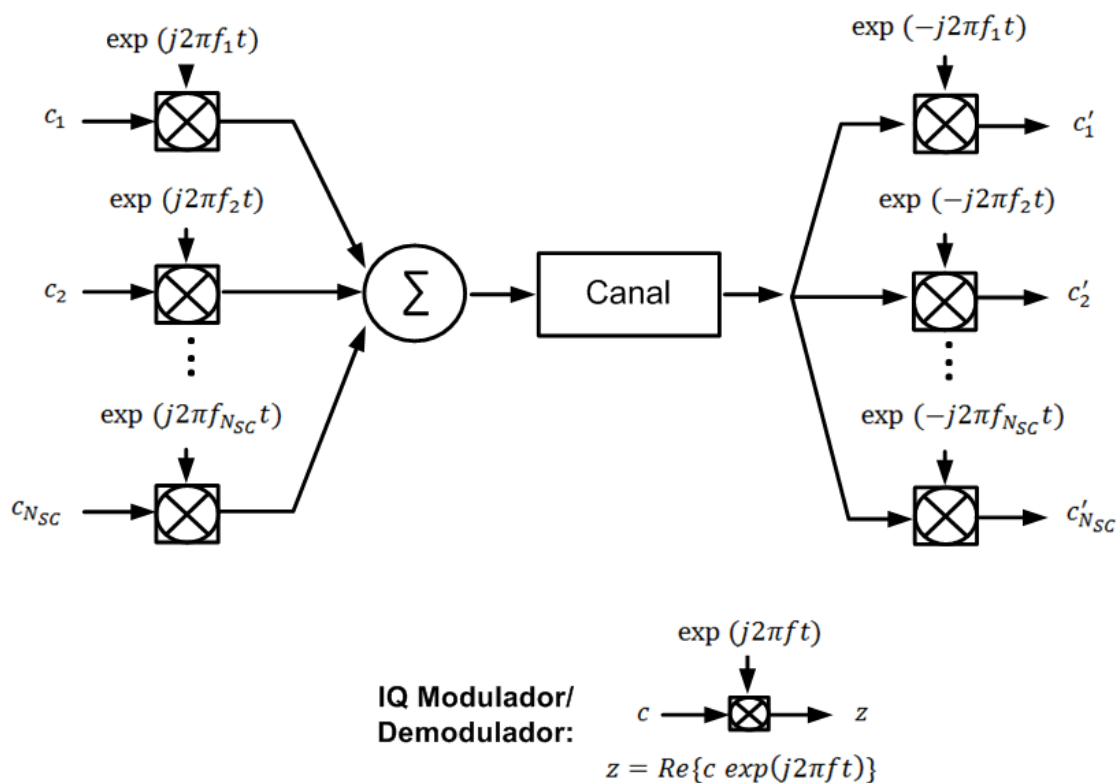


Figura 3 - Diagrama conceitual de um sistema de modulação multi-portadora

Um sinal  $s(t)$ , com modulação multi-portadora, pode ser representado como:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{N_{sc}} c_{ki} s_k(t - iT_s) \quad (1)$$

$$s_k(t) = \prod(t) e^{j2\pi f_k t} \quad (2)$$

$$\prod(t) = \begin{cases} 1, & (0 < t < T_s) \\ 0, & (t \leq 0, t > T_s) \end{cases} \quad (3)$$

$$\prod(t) = \begin{cases} 1, & (0 < t < T_s) \\ 0, & (t \leq 0, t > T_s) \end{cases} \quad (4)$$

onde  $c_{ki}$  é o  $i$ -ésimo símbolo na  $k$ -ésima subportadora,  $s_k$  é o formato de onda para a  $k$ -ésima subportadora,  $N_{sc}$  é o número de subportadoras,  $f_k$  é a frequência da  $k$ -ésima subportadora,  $T_s$  é o período do símbolo,  $\prod(t)$  é a função que forma o sinal.

O símbolo detectado  $c'_{ki}$  na saída é representado por:

$$c'_{ki} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) s_k^* dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) e^{-j2\pi f_k t} dt \quad (5)$$

na qual  $r(t)$  é o sinal recebido no domínio do tempo. A abordagem OFDM tem sua ortogonalidade originada da correlação direta entre duas subportadoras, dada por:

$$\delta_{kl} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s_k s_l^* dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \exp(j2\pi(f_k - f_l)t) dt \quad (6)$$

$$\delta_{kl} = \exp(j\pi(f_k - f_l)T_s) \frac{\sin(\pi((f_k - f_l)T_s))}{\pi((f_k - f_l)T_s)} \quad (7)$$

Se a condição (8) for satisfeita,

$$(f_k - f_l) = m \frac{1}{T_s} \quad (8)$$

então as duas subportadoras são ortogonais entre si. Isso significa que esse conjunto de subportadoras ortogonais, com frequências espaçada em múltiplos do inverso do período de símbolos (8), pode ser recuperado através de filtros casados sem interferência inter-subportadoras (ICI), apesar de uma forte sobreposição espectral do sinal.

Pode-se perceber que o sinal complexo OFDM em banda base equivale a uma Transformada de Fourier Discreta Inversa (IDFT) da sequência discreta formada pelos  $N_s$  subsímbolos QAM que compõe cada símbolo OFDM [7].

#### **2.1.4. Técnicas**

A interferência entre símbolos ocorre devido ao fenômeno de dispersão. Um símbolo OFDM, após percorrer uma longa distância, poderá cruzar o limite de outro símbolo vizinho, causando interferência. Para eliminá-la, introduz-se um intervalo de guarda a cada símbolo OFDM, como pode ser observado na Figura 5. Esse intervalo de guarda é projetado de tal forma que as componentes multipercurso de um símbolo OFDM não possam interferir na recepção do símbolo OFDM subsequente. Assim, um símbolo OFDM será constituído pelo símbolo útil OFDM e pelo intervalo de guarda.

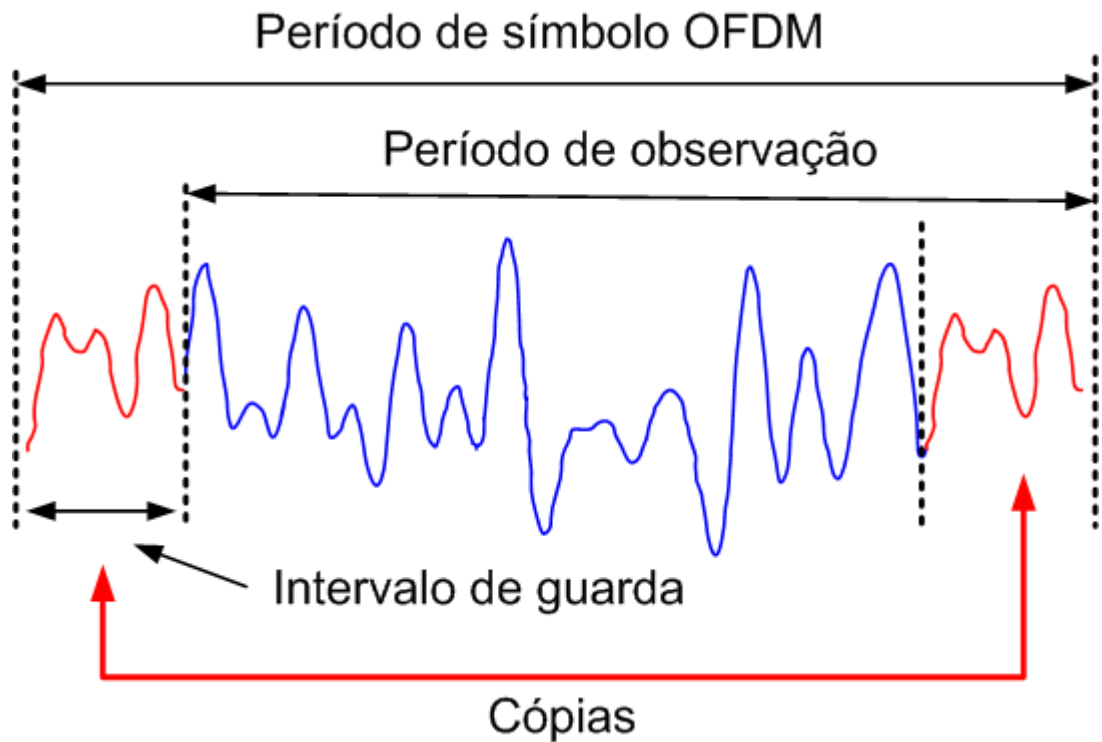


Figura 4 - Intervalo de guarda em um símbolo OFDM

Levando em consideração a dispersão descrita acima, símbolos OFDM de diferentes subportadoras não estarão alinhados, fazendo com que a condição da ortogonalidade seja perdida, resultando em interferência entre portadoras (ISI). A ISI não pode ser totalmente eliminada mas pode ser reduzida através da inserção de um prefixo cíclico no intervalo de guarda, que pode ser visto na Figura 6. Isso é equivalente a acrescentar ao início de cada símbolo certa quantidade de amostras da parte final do mesmo.

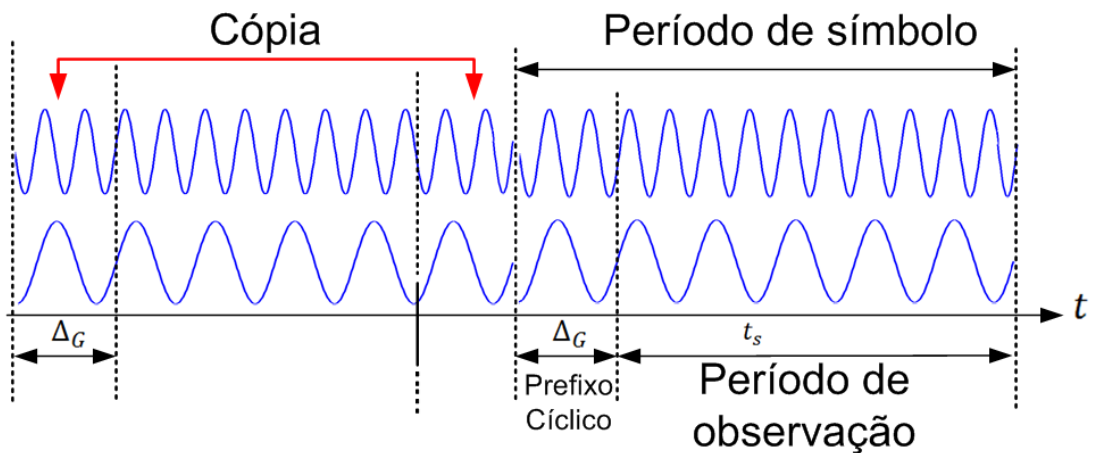


Figura 5 - Sinal OFDM com prefixo cíclico

Em outra vertente, a técnica *Channel estimation* é utilizado para ajudar a recuperar a informação transmitida [8]. Como o canal por onde o sinal passa não é perfeito e possui diferenças, comparado com outros canais, são necessárias técnicas para estimar e ajustar variação de tempo e frequência nos sistemas OFDM.

Adaptação do link é uma técnica para aumentar a eficiência espectral da rede. A ideia básica é ajustar parâmetros de transmissão de cada subportadora, de acordo com certas condições do canal, para maximizar a taxa de transmissão ou minimizar a potência transmitida. Por exemplo, um canal em boas condições, modulação *high-level* e menos correção de erro redundante são utilizados para aumentar a velocidade. Em contrapartida, modulação *low-level*, e mais correção de erro redundante são utilizados em condições fracas para garantir uma boa performance de transmissão.

### 2.1.5. Diagrama de blocos

Para melhor entender o tratamento e técnicas aplicados aos dados, um diagrama de blocos de um sistema OFDM pode ser observado abaixo, na Figura 7.

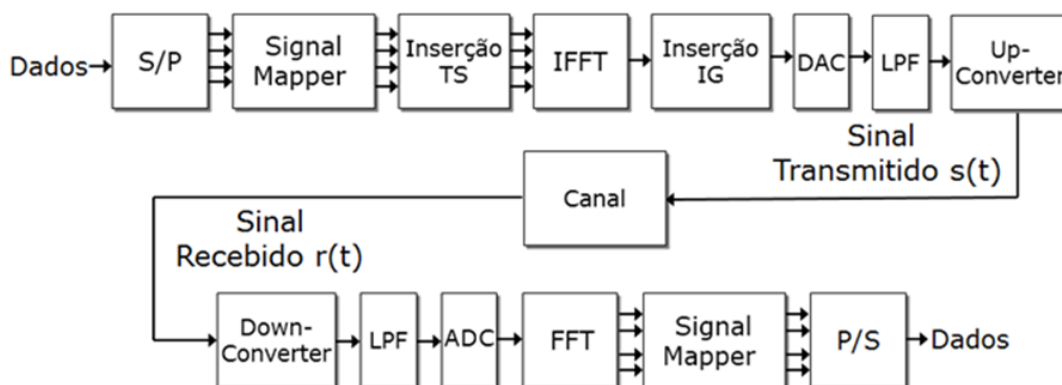


Figura 6 - Diagrama de blocos de um sistema OFDM

Primeiramente, no transmissor, os dados são convertidos de serial para paralelo (S/P) pelo conversor. Cada sinal destes é mapeado em símbolos (*Signal Mapper*) para as subportadoras. Então *training symbols* (TS) são inseridos para *channel estimation*. Estes sinais paralelos são modulados em subportadoras ortogonais entre si e convertidos para um sinal OFDM no domínio do tempo (sinal com componentes no domínio real e imaginário) através de uma IFFT. Um intervalo de guarda é adicionado para evitar dispersão, o sinal é convertido do digital para analógico (DAC) e um filtro passa-baixa é aplicado (*anti-aliasing*). Este sinal é passado por um *up-converter*, para alcançar a frequência desejada.

No receptor, o sinal é convertido para a banda base e do analógico para digital. O sinal OFDM é demodulado através de uma FFT. Os sinais demodulados passam por um módulo para obter o símbolo e, finalmente, os múltiplos canais de dados são convertidos para um canal único.

### **2.1.6. Vantagens e Desvantagens**

Diversas são as vantagens que a tecnologia OFDM oferece que são essenciais para os sistemas de transmissão futuros:

- 1) Solução efetiva para casos de interferência entre símbolos causada por um canal dispersivo, devido à alta capacidade de transmissão. A informação a ser transmitida é dividida em várias subportadoras moduladas em taxas de bit mais baixas, resultando em robustez frente à dispersão.
- 2) Possibilidade de melhorar a velocidade de transmissão alterando as subportadoras e o espectro.
- 3) Para diferentes condições de transmissão pode-se alterar o tipo de modulação para que melhor se adapte.
- 4) Alta eficiência espectral.
- 5) Processamento computacional é mais rápido utilizando operações FFT/IFFT.

A principal desvantagem do sistema OFDM é o alto *peak to average power ratio* (PAPR), que causa distorção no sinal transmitido, definida como a razão entre a potência máxima instantânea e a potência média do sinal transmitido. Os picos do sinal transmitido ficam distorcidos devido a uma combinação construtiva entre as subportadoras tornando o processo de equalização complexo.

## **2.2. O-OFDM**

Existem diversas formas de implementação de OFDM óptico. As duas formas consideradas principais, em [3] [9] [10], são descritas como OFDM com detecção óptica direta (DDO-OFDM) e detecção óptica coerente (CO-OFDM).

### **2.2.1. Detecção direta**

Na DDO-OFDM, a amplitude do sinal OFDM é transformada em intensidade óptica. A portadora também é transmitida juntamente com a banda base para que a detecção no transmissor seja realizada utilizando um fotodiodo, passando o sinal para o domínio elétrico.

DDO-OFDM pode ser classificada em duas categorias de acordo com o sinal gerado:

- 1) Mapeada linearmente, na qual o espectro óptico OFDM é uma réplica do sinal de banda base.
- 2) Mapeada de forma não linear, na qual o espectro óptico OFDM não exibe uma réplica da banda base.

A vantagem da DDO-OFDM está na sua implementação, que é relativamente mais simples e de menor custo. A desvantagem é que possui largura de banda ineficiente e sensibilidade OSNR menor [11].

### **2.2.2. Detecção coerente**

A CO-OFDM apresenta a melhor performance na sensibilidade do receptor (que melhora o alcance), eficiência espectral e robustez contra dispersão de polarização. Entretanto, necessita de um *design* complexo no receptor.

A ideia da técnica é misturar uma interferência, gerada por um oscilador, com o sinal recebido. Dessa forma, os sinais ópticos analógicos contêm toda a informação de amplitude, fase e polarização antes que sejam recebidos pelo fotodetector e convertidos em *streams* digitais. Posteriormente, os dados são recuperados por meio de *Digital Signal Processing* (DSP).

A performance superior da CO-OFDM faz com este seja um candidato promissor para sistemas de transmissão de longo alcance, enquanto a DDO-OFDM torna-se mais apropriada para aplicações de curto alcance [12] [13].

## CAPÍTULO 3: REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS BASEADAS EM OFDM

### 3.1 CONCEITO E ARQUITETURA

Num futuro próximo, será atingido o limite das redes ópticas baseadas em WDM e os problemas que esta apresenta [14] se tornarão cada vez mais significativos, à medida que os sistemas de transmissão ficam mais rápidos. Dado este cenário, será necessário desenvolver uma nova rede óptica, denominada elástica, que supra todos os requisitos para o tráfego futuro.

Os principais fatores para o desenvolvimento do paradigma de redes ópticas elásticas são: suportar 400 Gb/s, 1 Tb/s e demanda por taxas maiores; necessidade de largura de banda distintas; espaçamento de canal reduzido; *trade-off* entre alcance e eficiência espectral; rede dinâmica.

A rede óptica elástica é composta por comutadores ópticos (WXC's) no núcleo da rede, ambos independentes de largura de banda, e transponders de largura de banda variável (BVT) baseados, por exemplo, em OFDM na borda da rede. Sua arquitetura pode ser observada na Figura 8.

O objetivo dessa rede é prover transporte espectralmente eficiente (eficiência espectral) de dados de diversos clientes através da introdução de um algoritmo de roteamento flexível e granular no domínio óptico [15]. Nesta rede, os recursos espectrais necessários para uma dada rota são divididos do total disponível e alocados adaptativamente (taxa variável) ao caminho óptico.

Para que o desenvolvimento dessa nova rede seja possível serão necessárias inovações tanto em *hardware* quanto em *software*. Novos componentes deverão ser desenvolvidos e estes serão mais complexos. Também será um desafio o controle e o gerenciamento da rede, incluindo o estabelecimento de caminhos ópticos elásticos. Como exemplo destes novos dispositivos há a comparação entre o *transceiver* fixo e um flexível, que se encontra na Figura 9.

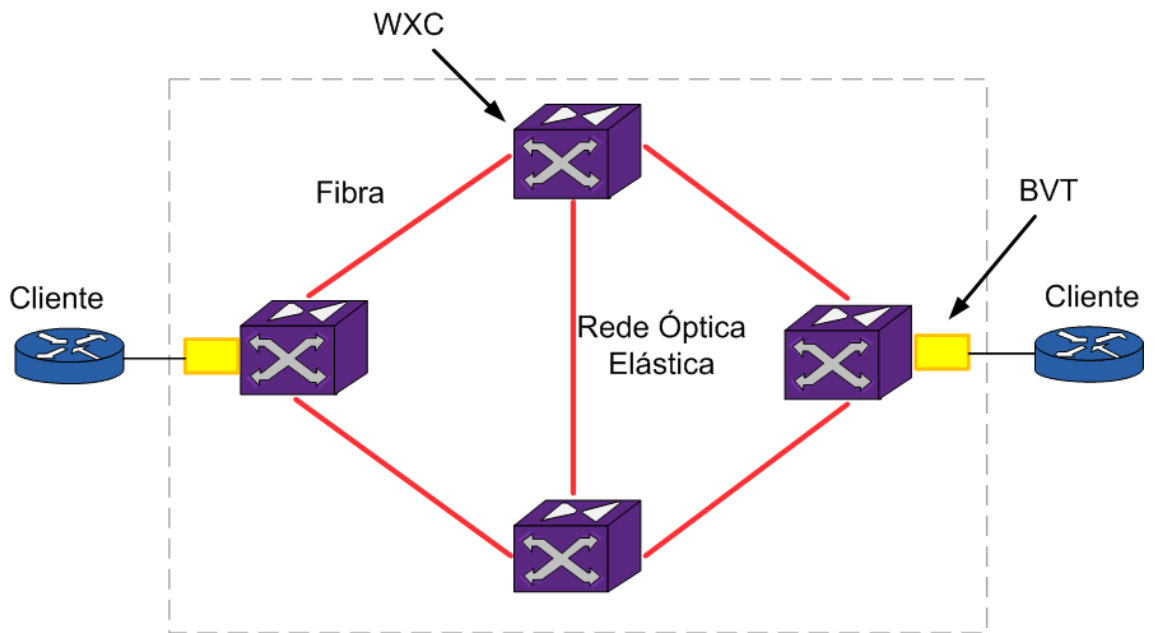


Figura 7 - Arquitetura de uma rede óptica elástica [2]

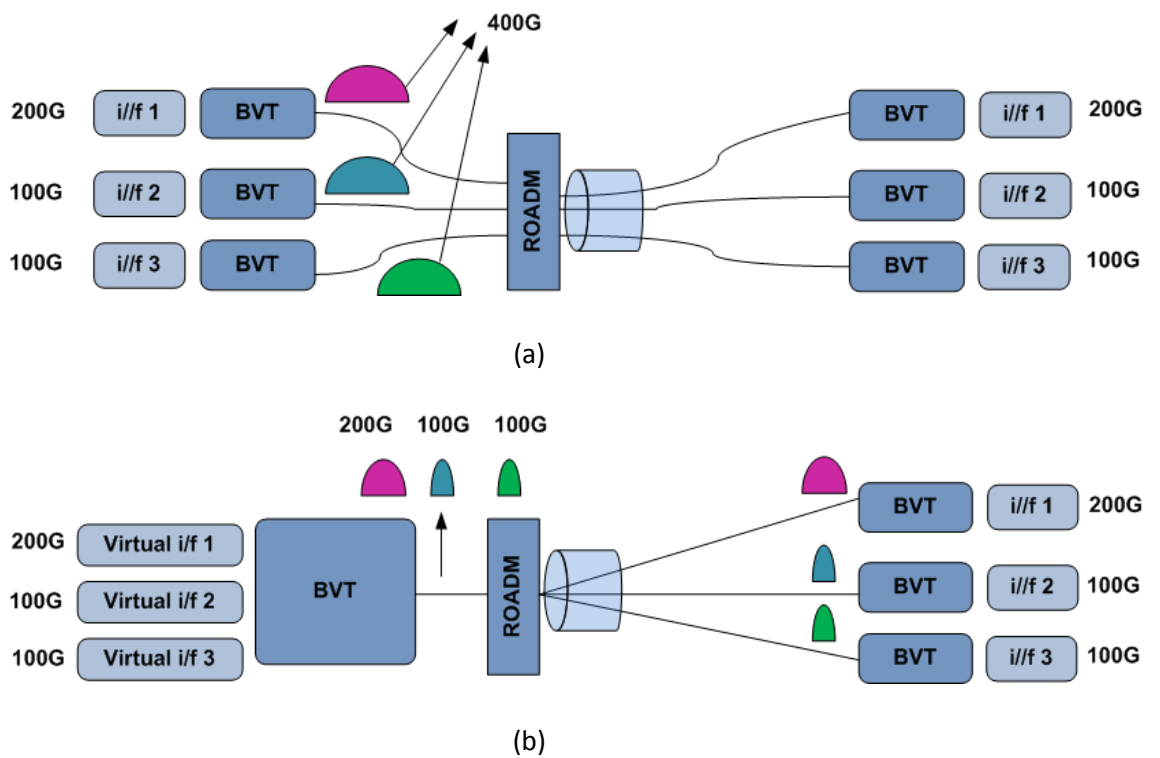


Figura 8 - Transceivers com 3 demandas: a)Fixo; b)Flexível.[16]

### 3.2 BENEFÍCIOS

A introdução das redes ópticas elásticas baseadas em OFDM pode gerar diversos benefícios, dentre eles:

- Suporte a agregação de serviços com granularidade flexível, possibilitando acomodar diversas taxas de dados.
- Alta eficiência espectral através da alocação de espectro de maneira flexível, variando de acordo com a taxa de dados, que pode ser observado na Figura 10 (e).
- Com a possibilidade de ajuste do formato de modulação e o número de subportadoras é possível ter um alcance diferente, de acordo com as necessidades. Pode ser observado na Figura 10 (c) as necessidades de cada demanda (taxa e distância), e na Figura 10 (d) têm-se as demandas moduladas de acordo com necessidade de taxa de transmissão e a quantidade de recursos alocados sem necessidade.
- Consumo de energia eficiente, devido a possibilidade de “desligar” subportadoras que não são necessárias.

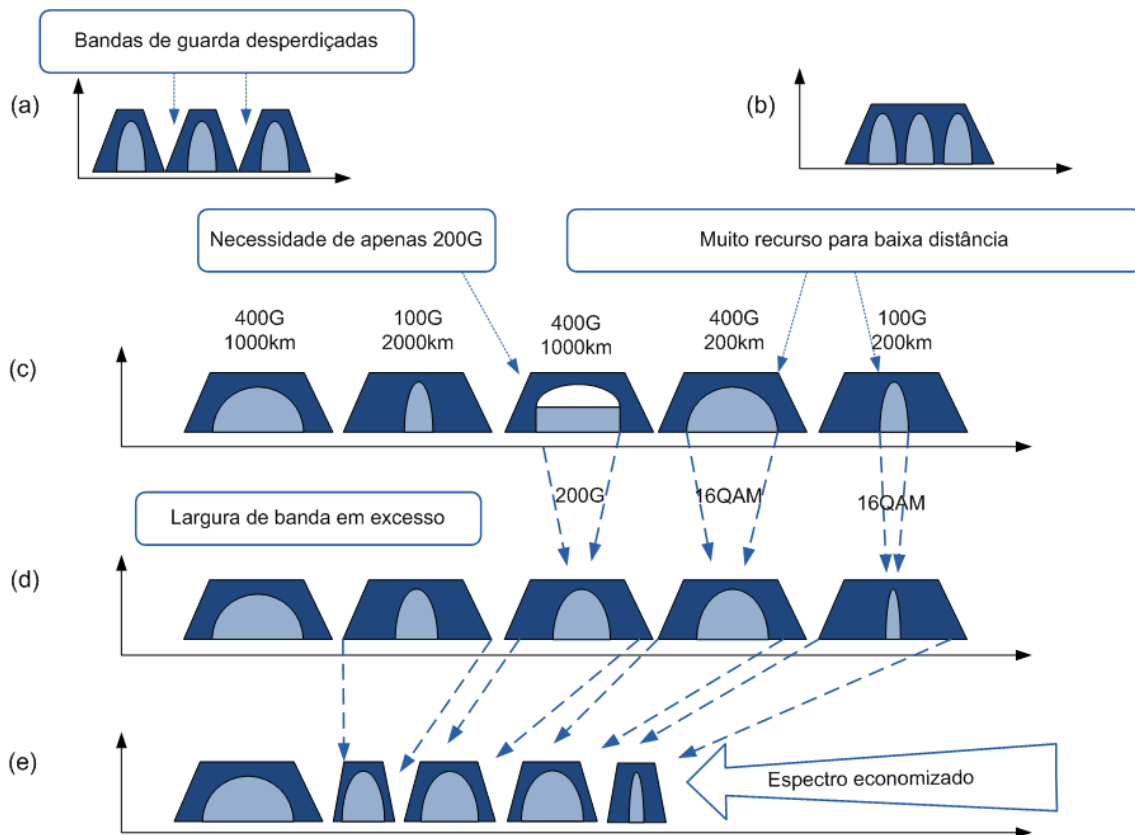


Figura 9 - a) Grid fixo; b) Supercanal; c) 5 demandas com suas necessidades espectrais; d) 5 demandas moduladas adaptativamente; e) 5 demandas com espectro flexível. [16]

Ao introduzir adaptação no domínio óptico, alguns benefícios são obtidos por meio da taxa adaptativa e da distância adaptativa que foram citadas anteriormente e serão detalhadas logo a seguir.

### **3.2.1 Taxa adaptativa**

Nas redes ópticas convencionais a eficiência de utilização da rede é limitada devido à natureza rígida da rede. Uma das limitações é originada pelo descasamento de granularidades entre a camada do cliente, que possui uma variedade de requisitos por capacidade, desde baixa até 100Gb/s ou mais, e a camada de comprimento de onda física, que possui uma grande e rígida granularidade de comprimento de onda. Por exemplo, quando o volume de tráfego de um cliente não é suficiente para utilizar toda a capacidade disponível, uma parte da largura de banda é desperdiçada. As redes ópticas atuais suavizam este problema agregando e roteando o fluxo de dados com taxa de bits pequena com comutadores ópticos elétricos e TDM ou switches de transporte de pacotes. No entanto, tal abordagem tem desvantagens em termos de custo extra e consumo de energia, especialmente para dezenas de Gb/s e, ainda, pela ineficiência do espectro e operações mais complexas devido ao aumento do número de camadas.

Redes ópticas elásticas e adaptativas atenuam o problema de descasamento de granularidades alocando dinamicamente o mínimo de recursos espectrais necessários no domínio óptico [17]. Assim, proporcionam tráfego de dados de maneira eficiente, escalável e à prova de acomodações futuras dos canais, de acordo com o volume atual do tráfego do usuário.

Em Jinno (2009) [15], vê-se o aumento da eficiência de utilização da rede de um enlace óptico entre dois nós. A alocação em redes ópticas elásticas e adaptativas (com taxa adaptativa) baseadas em OFDM é comparada com um caminho óptico, de largura de banda fixa, de 100 Gb/s e multiplexação inversa onde este caminho é quebrado em múltiplos canais WDM de baixa taxa de bits. Quando a taxa de tráfego média aumenta, a rede óptica elástica e adaptativa apresenta grande vantagem sobre a outra.

### **3.2.2 Distância adaptativa**

Outra limitação da eficiência da rede atual, em termos de performance de transmissão, é o seu design baseado em pior caso. Este design garante que, no pior caso, o caminho óptico da rede- que na maioria dos casos é o caminho mais longo com múltiplos repetidores, WXC's – possa ser transmitido com qualidade suficiente. Como resultado, diversos caminhos ópticos, com distâncias bem menores que do pior

caso, terão uma grande margem não utilizada de OSNR e deficiências não lineares no receptor final.

Introduzindo a alocação de espectro baseado na distância, essas margens inutilizadas para conexões mais curtas podem ter seus recursos espectrais conservados, enquanto garantem que a taxa de dados se mantenha constante. Um formato de modulação espectralmente eficiente, mas de curto alcance como o QAM-16 é utilizado para caminhos ópticos curtos, enquanto que um formato de modulação como o QPSK é empregado em caminhos ópticos mais compridos [17]. A alocação de espectro baseado na distância pode conservar os recursos espectrais para caminhos curtos, necessitando bem menos recursos espectrais que a atual alocação de espectro para pior caso.

No trabalho de Takagi (2010) [18], foi avaliada a eficiência de utilização da rede elástica para topologias em anel e malha. Um algoritmo de roteamento e alocação de espectro (RSA) com restrição de continuidade do espectro foi desenvolvido e utilizado no lugar do convencional algoritmo de roteamento e alocação de comprimentos de onda (RWA). Foi observado que as novas redes, comparadas com um cenário de grid fixo em 100 GHz, podem conservar os recursos espectrais exigidos em até 33% para a rede em anel e 50% para a rede em malha.

### **3.3 TECNOLOGIAS EM NÍVEL DE NÓ**

#### **3.3.1 BVT**

O BVT é um dispositivo capaz de suportar múltiplas taxas de dados vindas de subportadoras e transmiti-las para superportadoras. Para alcançar uma alta utilização dos recursos espectrais, o BVT precisa gerar o sinal óptico utilizando apenas recursos espectrais necessários, de acordo com a taxa de dados do cliente e das condições do canal [2]. Diferentes abordagens podem ser utilizadas para alcançar tal objetivo, algumas delas enumeradas a seguir.

##### 1) Ajuste do número de subportadoras

O controle do número de subportadoras pode ser realizado tanto no domínio óptico quanto no digital, dependendo do método de síntese do sinal. Para sistemas O-OFDM, o BVT consiste de uma fonte óptica variável multiportadora e um modulador óptico multiportador. Através do ajuste da luz com diferentes frequências de oscilação é possível controlar o número de subportadoras. Na Figura 11 observam-se as taxas de cada subportadora, correspondentes ao ajuste da granularidade.

## 2) Modulação adaptativa

Com o ajuste do formato de modulação é possível obter diferentes taxas de dados. Para aumentar a taxa de dados transmitida, um formato de modulação com mais bits por símbolo pode ser utilizado, com a limitação de um OSNR mínimo necessário para recuperar a informação, enquanto é mantida constante a taxa de símbolo.

## 3) Geração de sinal para superportadora

Para serviços de superportadora, diversos canais OFDM podem ser alocados juntos em um super-canal, transportando múltiplas vezes a capacidade de um único canal OFDM, que é limitado pela capacidade máxima de subportadoras do BVT. Primeiramente o fluxo de dados é dividido em vários canais, e depois são modulados em caminhos ópticos OFDM contínuos sem banda de guarda entre si. Este caminho opticamente agregado de superportadora ocupa menos recursos espectrais que o método correspondente de multiplexação WDM, deixando espaço para um futuro tráfego adicional.

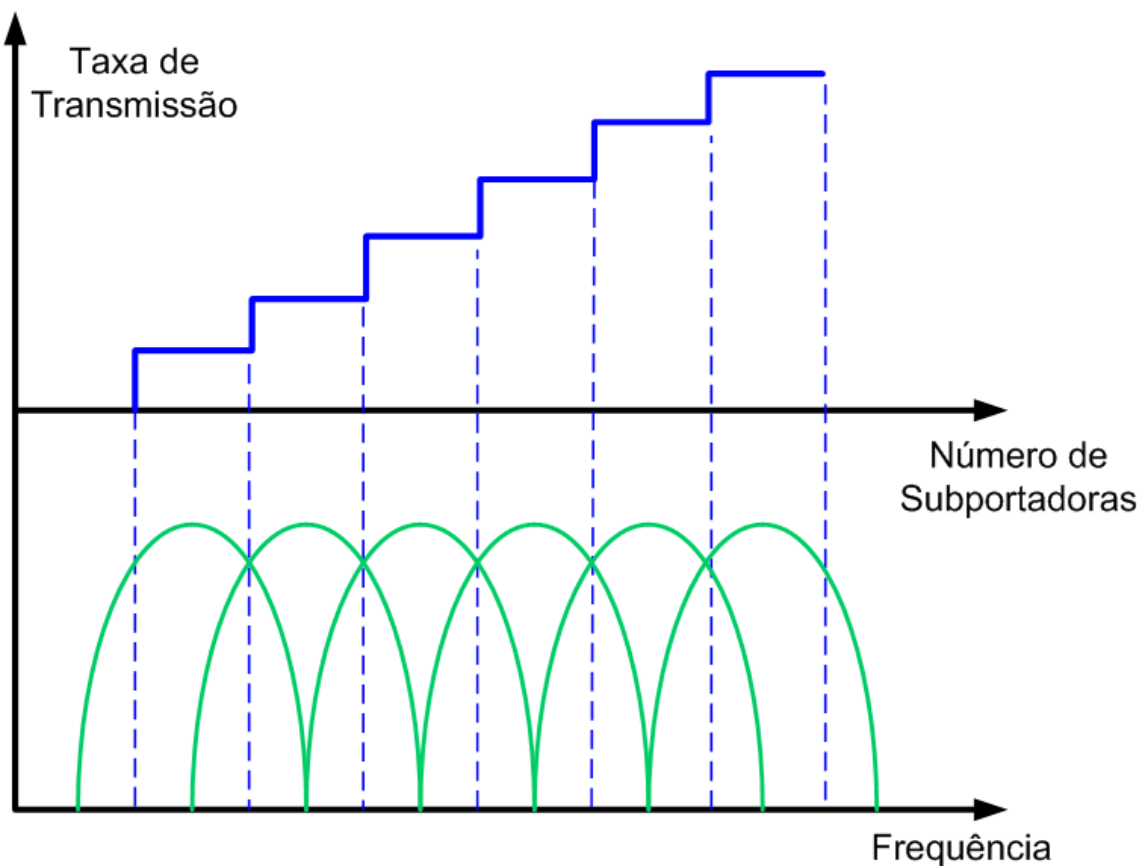


Figura 20 - Variação da taxa de transmissão/Largura de banda através do ajuste do número de subportadoras [2]

### 3.3.2 WXC

Para suportar um caminho óptico elástico do início ao fim, todo WXC ao longo do caminho deve alocar uma conexão cruzada de tamanho apropriado que corresponda a largura de banda do espectro. Para isso, o WXC deve configurar a janela de comutação de uma maneira flexível de acordo com a largura espectral do sinal óptico recebido.

O tradicional filtro seletivo de comprimento de onda (WSS) é projetado para canais com espaçamento fixo, pois usualmente a relação entre canais WDM é de um para um [20]. Já o BV-WSS, que é uma tecnologia recente, é projetado para agrupar granularidades de comutação próximas, acomodando a largura do canal de maneira flexível, como pode ser observado na Figura 12.

Em outra vertente, WSS com largura de banda variável baseados em cristal líquido ou *Micro-Electro Mechanical System* (MEMS) podem ser implantados como elementos de comutação para realizar as conexões cruzadas com largura de banda variável e frequência central. Suas principais características e tipos são citados a seguir [2].

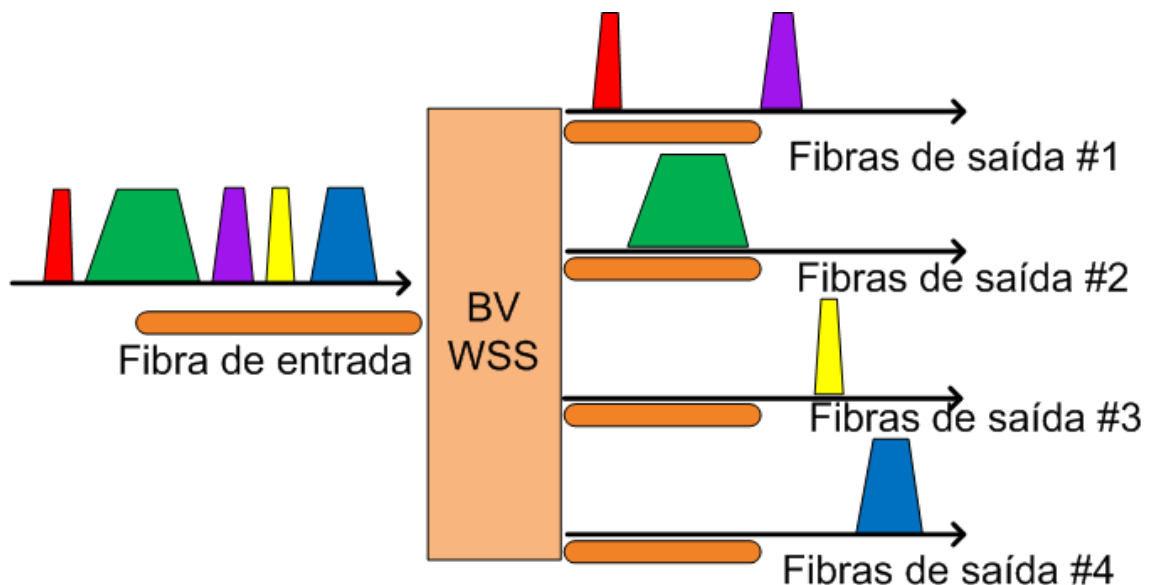


Figura 31 - Conceito de BV-WSS [2]

#### 1) LCoS-Based BV-WSS

LCoS é uma tecnologia de *display* que combina cristal líquido e tecnologias de semicondutores para criar um mecanismo de display de estado sólido e alta resolução

[20]. Componentes LCoS são utilizados para controlar a fase da luz em cada pixel para produzir uma grade programável e deflexão de feixes.

## 2) MEMS-Based BV-WSS

Este filtro de bloqueio é baseado em uma grade de difração livre de espaço, combinado com um vetor linear de eixos MEMS de inclinação simples. Múltiplas granularidades contínuas de 13,2 GHz são combinadas para formar um filtro passa banda mais largo, que permita a variação da largura espectral e da localização dos canais selecionados [21] [22].

## 3) Banda de guarda e características de filtro

Teoricamente, um sinal com espectro contínuo baseado em OFDM não tem necessidade de banda de guarda no domínio da frequência entre canais OFDM. Entretanto, quando um sinal OFDM é transmitido por diversos WXC, as subportadoras das bordas do espectro sofrem uma penalidade maior devido as imperfeições dos filtros WSS. Com a inclusão de uma banda de guarda entre caminhos ópticos adjacentes este problema pode ser diminuído ao custo de reduzir a eficiência espectral [2].

Além disso, se a filtragem no WSS for necessária para realizar funções de retirada e inclusão no WXC, sinais residuais de canais adjacentes, além dos canais que foram retirados ou incluídos, permanecerão devido a inclinação finita das bordas do filtro. Para evitar altas penalidades devido ao *cross talk*, um intervalo de guarda deve ser adicionada entre canais adjacentes. O tamanho deste intervalo dependerá do número de filtros em cascata e das características de filtragem do WSS. O *trade-off* entre o formato do filtro e da largura de banda de guarda foi numericamente analisada no trabalho realizado por Kozicki et al. (2009) [23]. Os resultados mostraram que, para o caso de uma transmissão por 10 estágios de filtragem em cascata com formato Gaussiana de segunda ordem, a banda de guarda ótima para canais OFDM com subportadoras de 10 Gb/s é de 30GHz.

## 4) Arquitetura nodal de WXC

Através dos BV-WSS mencionados anteriormente, um WXC pode ser construído utilizando uma arquitetura de difusão e seleção [15] [24] ou não difusão e seleção [25]. Essa arquitetura pode ser observada na Figura 13. A estrutura do WXC precisa suportar as seguintes características mencionadas em Gringeri (2010) [26]:

- *colorless*, ou seja, serviços de retirada e inclusão para todos os comprimentos de onda
- *directionless*, ou seja, serviços de retirada e inclusão para qualquer direção
- *contentionless*, ou seja, os serviços de retirada e inclusão de um mesmo comprimento de onda para diferentes direções

Na arquitetura de difusão/seleção, Figura 13 (a), os sinais de entrada são transmitidos para todas as portas de saída e os canais adequados são seleccionados em cada porta de saída utilizando WSS. Na arquitetura de não difusão/seleção, Figura 13(b), os sinais de entrada são demultiplexados por um WSS, e depois roteados para diferentes portas de saída utilizando conexões cruzadas ópticas, combinadas por um acoplador na porta de saída. Divisores ópticos podem ser utilizados para prover funcionalidade *broadcast* multiplexado.

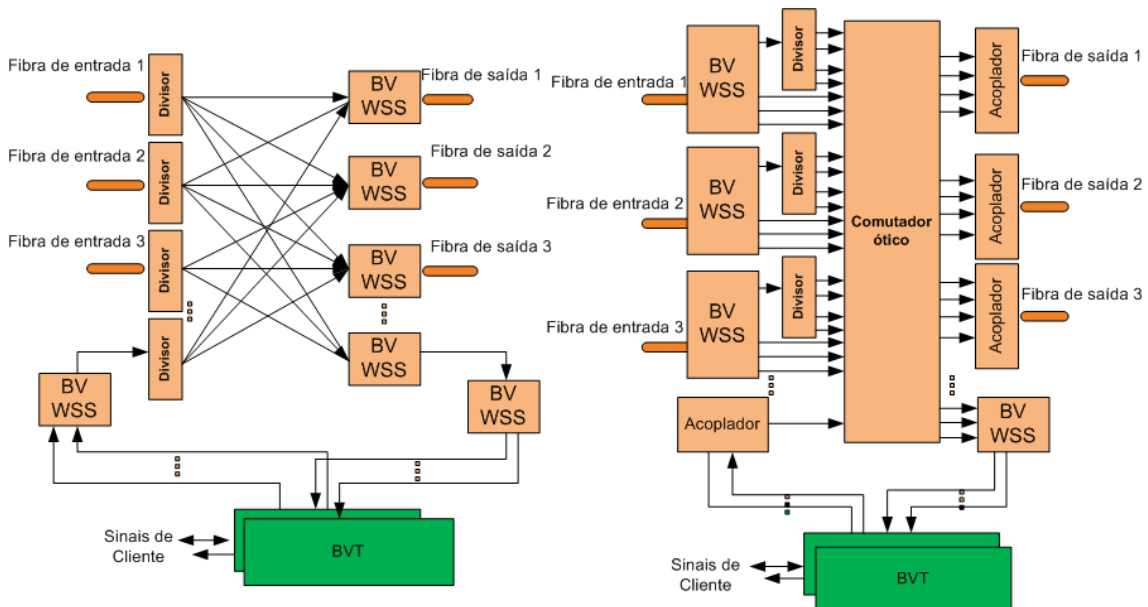


Figura 42 - Arquitetura de um WXC: a) difusão e seleção; b) não difusão e seleção [2]

### 3.4 TECNOLOGIAS EM NÍVEL DE REDE

Para que as redes ópticas elásticas se concretizem, algumas exigências em nível de rede devem ser atendidas [2]. Primeiramente, para garantir as conformidades entre as diversas implementações, é necessário definir uma especificação padrão para a granularidade espectral de modo a habilitar a alocação espectral e comutação flexível. Após definido o *slot*, novos algoritmos RSA flexíveis serão necessários para planejamento da rede e alocação dinâmica dos recursos. Outras exigências são necessárias como: sobrevivência da rede, de tal modo que a mesma possa se

recuperar de possíveis falhas, esquemas de gestão e controle da rede e estratégias para eficiência energética.

#### **3.4.1 Especificação de slot de espectro flexível**

Para que a nova rede seja concebida, uma nova especificação de *slot* de espectro flexível é necessária. Assim, esta especificação deverá acomodar eficientemente as sub e superportadoras e volumes de tráfego com taxas diferentes. Além disso, deverá ser independente do formato do sinal e ter a possibilidade de taxas futuras, mais rápida, serem utilizadas.

Uma especificação de recursos espectrais foi proposta em Jinno (2010) [27]. Nela, o espectro óptico é dividido em *slots* de frequência com números contínuos e a largura de cada slot corresponde a largura de espectro da subportadora OFDM. Dois candidatos foram levantados para a especificação de *slot* de espectro flexível: *Single Slot*, o qual garante compatibilidade com o *grid* atual (ITU-T), e o *Double-Sided Half Slot*, o qual divide um *grid* ITU-T (12,5 GHz) em dois *slots* espectrais, introduzindo um novo sistema de numeração de *slot*. Este último não possui compatibilidade com o *grid* atual, mas proporciona maior flexibilidade na alocação de banda e melhor granularidade [28] [29].

#### **3.4.2 Algoritmo RSA**

Para as redes ópticas elásticas, o tradicional algoritmo de roteamento e atribuição de comprimentos de ondas (RWA), utilizado em redes WDM não é mais aplicável, necessitando de um novo algoritmo: o RSA [15] [30].

No RSA, a tradicional restrição de continuidade do comprimento de onda das redes WDM é transformada em uma restrição de continuidade do espectro. Uma conexão necessitando de certa capacidade deve ser satisfeita atribuindo certo número de *slots* contínuos de uma subportadora [35].

#### **3.4.3 Agregação de tráfego**

Nas redes ópticas WDM, agregação de tráfego é uma funcionalidade comum, onde múltiplas requisições de tráfego de baixa velocidade são agregadas em um caminho de alta capacidade. Já nas redes ópticas elásticas, os serviços de subportadoras podem ser suportados diretamente pelos *transponders* de taxa/largura de banda variável e caminhos ópticos elásticos. Maiores detalhes, algoritmos e cenários estão presentes no capítulo 4.

#### **3.4.4 Estratégias de sobrevivência**

A sobrevivência em redes ópticas elásticas é um dos seus principais aspectos desta. Com a introdução do caminho óptico elástico, que possui largura de banda e taxa variável, um novo esquema de recuperação foi proposto em Sone et al. (2009) [31]. Neste esquema, o caminho óptico elástico pode ser estabelecido a partir das políticas baseadas em *Service Level Agreement* (SLA), tais como, taxas de transmissão, média e de pico, contratadas por um cliente [2]. Em caso de falha, o esquema proposto pode comprimir o tráfego até o limite definido utilizando as funcionalidades de variação de largura de banda e de taxa, quando não há largura de banda suficiente para a rota de restauração. No trabalho de Guoying (2013) [2], é demonstrado que essa restauração proporciona maiores oportunidades a conectividade em caso de falhas do que os esquemas utilizados em redes ópticas com *grid* fixo.

#### **3.4.5 Eficiência Energética**

O consumo de energia e a eficiência energética são preocupações comuns em diversas áreas. Na construção de redes de comunicação é importante que a eficiência energética seja levada em consideração, já que a redução no consumo de energia pode trazer benefícios (aos problemas climáticos futuros), assim como a expansão das redes para suportar o rápido crescimento da demanda por tráfego [32].

Com a utilização de redes baseadas em OFDM, é possível reduzir o consumo de energia da rede, pois proporcionam uma eficiente utilização dos recursos espectrais e menor número de *transponders* e amplificadores quando comparados com as tradicionais redes WDM.

Jinno et al. (2009) [15] afirma que o consumo de energia da rede pode ser reduzido, de maneira geral, através do ajuste do número de subportadoras, realizado pelos BVTs, ligando/desligando subportadoras e de ajuste da potência dos amplificadores ópticos.

#### **3.4.6 Esquemas de gerenciamento e controle da rede**

As redes ópticas elásticas baseadas em OFDM proporcionam grande flexibilidade no provisionamento de largura de banda dinâmico. Mecanismos avançados de controle e gerenciamento de rede são essenciais para suportar o provisionamento de conexões, o ajuste de largura de banda e as operações de recuperação na nova arquitetura de rede. Para suportar a nova especificação espectral do slot, a distribuição das informações sobre os espectros disponíveis e o ajuste de largura de banda (entre outros), os protocolos de sinalização e roteamento

do plano de controle devem ser estendidos. Além destes, para suportar os esquemas de restauração por compressão da largura de banda, dois níveis de *Label-Switched Path* (LSP) devem ser suportados pelo plano de controle, para controlar tanto os canais OFDM, quanto as subportadoras OFDM [30].

Contudo, mais estudos devem ser realizados, pois ainda não foram definidos protocolos de controle e diversos mecanismos ainda devem ser aprimorados. Além disso, será necessário melhor padronização e pesquisa.

## CAPÍTULO 4: AGREGAÇÃO ÓPTICA DE TRÁFEGO

### 4.1 PRINCÍPIOS DE AGREGAÇÃO ÓPTICA

A ideia básica da agregação óptica é agrupar múltiplos caminhos ópticos de subportadoras em um único BVT e comutá-los como um todo [15]. Esse agrupamento é realizado para suportar agregação de modo transparente, sem conversão do sinal do domínio óptico para elétrico. Esse grupo de caminhos ópticos pode ser chamado de túnel óptico. A possibilidade de realizar agregação óptica se dá devido a flexibilidade espectral proporcionada pelo WXC, onde sinais ópticos com largura de banda espectral arbitrárias podem ser comutados em redes ópticas elásticas.

Uma banda de guarda pode ser utilizada para aliviar os problemas descritos no item 3 de 3.3.2. Entretanto, quando se está realizando agregação óptica, é desejável que não exista banda de guarda entre caminhos ópticos, pois isto diminuirá a eficiência espectral e do uso dos BVTs.

Com a característica da ortogonalidade dos sinais OFDM [33], o tráfego originado de uma mesma fonte (BVT) pode ser agrupado sem o uso de bandas de guarda. O uso destas se dá apenas entre túneis ópticos para fins de comutação.

Quando os tráfegos são originados de uma mesma fonte e tem destinos iguais, este pode ser comutado como um único túnel óptico, onde os problemas de filtragem não afetarão os caminhos ópticos que compõem esse túnel. Quando os tráfegos são originados de uma mesma fonte com destinos diferentes, um subconjunto de subportadoras do túnel óptico pode ser retirado ou comutado opticamente em qualquer nó intermediário ao longo da rota [34]. Este procedimento pode ser observado na Figura 14, onde um caminho óptico precisa ser retirado no nó b. Deve-se notar que assim que o caminho óptico é retirado, bandas de guarda são adicionadas ao túnel remanescente e ao que foi retirado, possibilitando a comutação destes no futuro.

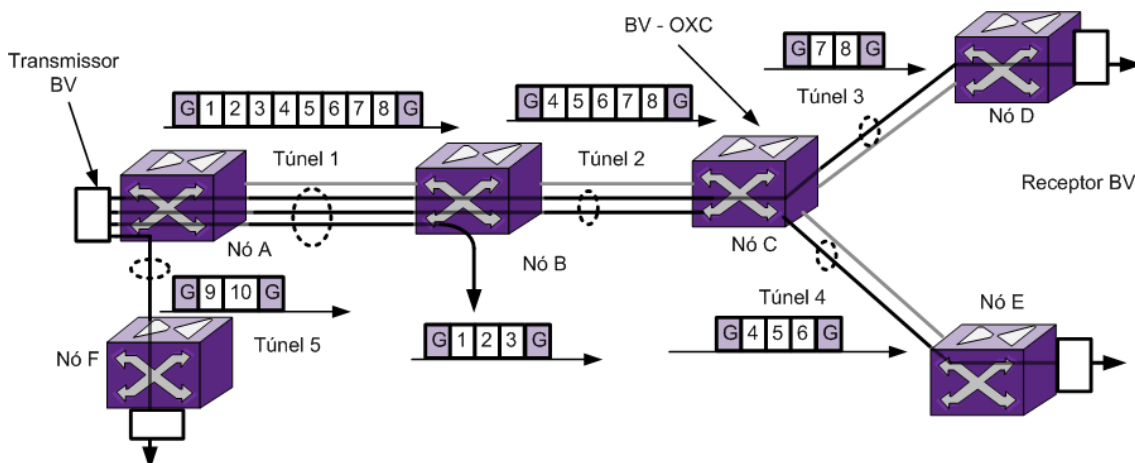


Figura 13 - Agregação óptica em redes ópticas elásticas [34]

Para que o procedimento descrito acima seja possível é necessário que os OXCs possuam a arquitetura de difusão/seleção [15][23]. Na Figura 15, o túnel 2 tem seu espectro difundido para todas as portas de saída. Com o uso de BV-WSSs, os túneis 3 e 4 são formados a partir de filtragens realizadas no espectro do túnel 2.

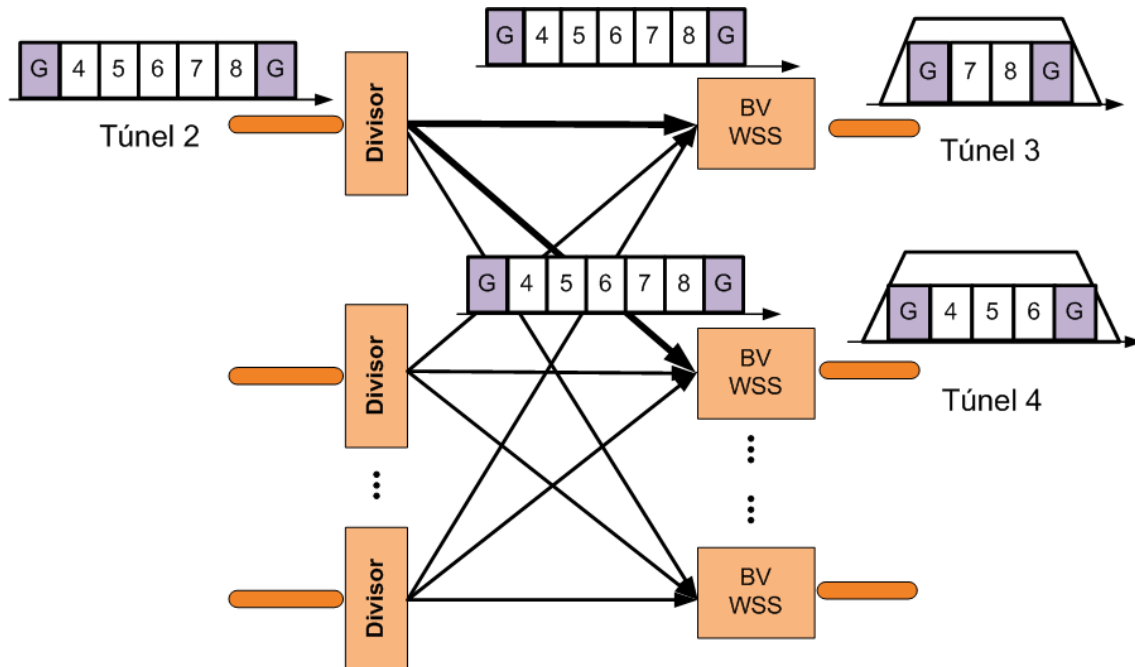


Figura 54 - Estrutura de um XC para difusão e seleção [34]

A ortogonalidade não é garantida quando os tráfegos são originados de fontes diferentes. Sendo assim, devem ser recebidos separadamente utilizando receptores distintos. Desse modo, pode-se dizer que a agregação óptica não diminui o número de receptores, apenas de transmissores. Além de reduzir os transmissores, recursos espectrais são economizados devido à banda de guarda entre caminhos ópticos, que pode ser eliminada.

#### 4.2 ALGORITMOS

Os algoritmos RSA são essenciais para o planejamento de uma rede óptica elástica e com o uso da agregação óptica, o número de restrições aumenta a complexidade desses algoritmos.

As restrições necessárias, além das utilizadas pelos algoritmos sem agregação óptica, são: uso de um único transmissor, espectro contínuo e subportadoras consecutivas ou contíguas [35], serviços agregados de subportadoras devem utilizar um conjunto de slots espectrais consecutivos dentro da faixa espectral do transmissor, número de serviços agregados limitado pela capacidade máxima de subportadoras do

BVT, túneis ópticos devem ser separados por bandas de guarda e os caminhos ópticos dentro dos túneis não devem ter banda de guarda.

#### **4.2.1 Programação Linear Inteira (ILP)**

A programação linear utilizada para a agregação óptica é uma variante da formulação de ILP para RSA sem agregação óptica [35]. A diferença é que a primeira possui um maior número de restrições e é mais complexa devido à dificuldade de suportar a agregação óptica. Estas restrições são expostas em Zhang, De Leenheer, Mukherjee (2012) [34] e uma análise da complexidade do algoritmo é realizada.

Para o ILP, o número de variáveis e restrições usadas depende dos possíveis caminhos que podem ser agregados em um túnel. Desta forma, a partir da formulação do programa linear, o número de variáveis e restrições do ILP com agregação óptica é de  $(N^4 + k^2N^3 + N^3 + (k + 2)N^2)$  e no pior caso é de  $(N^4 + 4k^2N^3 + 4N^3 + (k + 4)N^2)$ , nas quais  $N$  = número de restrições e  $k$  = número de caminhos mais curtos pré-calculados [34]. Quando  $N \gg k$ , o desempenho do problema se iguala ao ILP sem agregação óptica.

#### **4.2.2 RSA Heurístico**

No trabalho de Zhang, De Leenheer, Mukherjee (2012) [34], dois algoritmos heurísticos para RSA são expostos. Estes tem uma performance melhor do que o ILP em redes de maiores dimensões. Os algoritmos são o *Least Spectrum Grooming* (LSG) e o *Minimum Transmitter Grooming* (MTG).

O LSG prioriza minimizar o uso espectral total, juntando os caminhos ópticos originados de uma fonte em comum e que possuam uma rota em comum. O MTG prioriza minimizar o número de transmissores utilizados, modificando partes do algoritmo LSG para usar a capacidade espectral máxima de um túnel no lugar da capacidade real deste.

Para o pior caso, a complexidade dos algoritmos é  $O(kN^3(NZ + DB + kN))$ , na qual  $N$  = número de restrições,  $k$  = número de caminhos mais curtos pré calculados,  $Z$  = capacidade média,  $D$  = tráfego máximo entre um par fonte/destino e  $B$  = número de slots espectrais. Com estes algoritmos heurísticos, o tempo computacional foi reduzido para dezenas de segundos, o que pode ser considerado uma boa melhoria quando comparado ao ILP, com horas de tempo computacional [34].

### **4.3 EXEMPLOS DE DESEMPENHO**

Em um estudo de Zhang, De Leenheer, Mukherjee (2012) [34], foram realizados experimentos para medir a performance da agregação óptica utilizando ILP

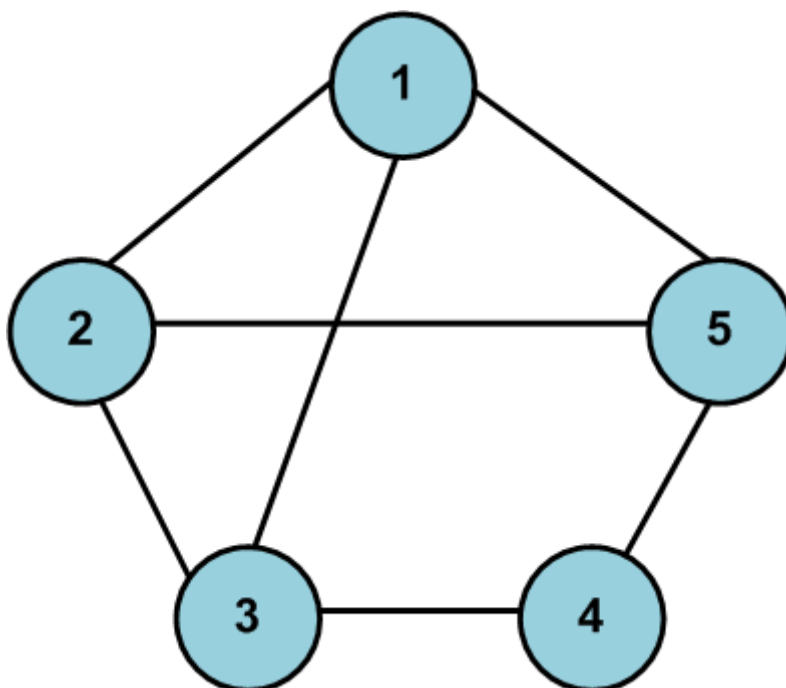
e algoritmos heurísticos. Os resultados dessas simulações foram comparados com o cenário de [36], que não utiliza agregação óptica. Para solucionar o ILP foi utilizado o IBM CPLEX.

Algumas especificações foram definidas no trabalho [34]:

- slot espectral com largura de 12,5 GHz
- modulação QPSK, cada subportadora com capacidade de 25 Gb/s
- máxima capacidade do transmissor é de 400 Gb/s
- tamanho da banda de banda é de 2 slots espectrais
- demanda de tráfego para cada par (s,d), em termos de número de subportadoras, foi gerado randomicamente entre 1 e D [4,6,8,10,12,16]

#### **4.3.1 Rede pequena**

Foi utilizado para o estudo uma rede com 5 nós. A topologia desta rede pode ser observada na Figura 16. Os resultados da simulação realizada Zhang, De Leenheer, Mukherjee (2012) [34] podem ser observadas nas Figuras 17 e 18. Esses resultados demonstram economias do número de transmissores e de uso do espectro para diferentes valores de granularidade em diferente cenários (com e sem agregação óptica). Para o cenário sem agregação óptica foram utilizadas simulações apresentadas em Christodoulopoulos, Tomkos e Varvarigos (2010) [35].



*Figura 65 - Rede de pequenas dimensões, 5 nós [34]*

Analisando a Figura 17 pode-se observar que com o uso de agregação óptica há uma significativa economia de transmissores, de 15% a 75%, quando comparada

aos cenários sem agregação óptica de Christodouloupoulos, Tomkos e Varvarigos (2010) [35]. Os algoritmos ILP e MTG tiveram uma melhor performance em relação ao LGS, e este desempenho diminui conforme a granularidade do tráfego aumenta, pois diminuem-se as oportunidades de realizar agregação óptica.

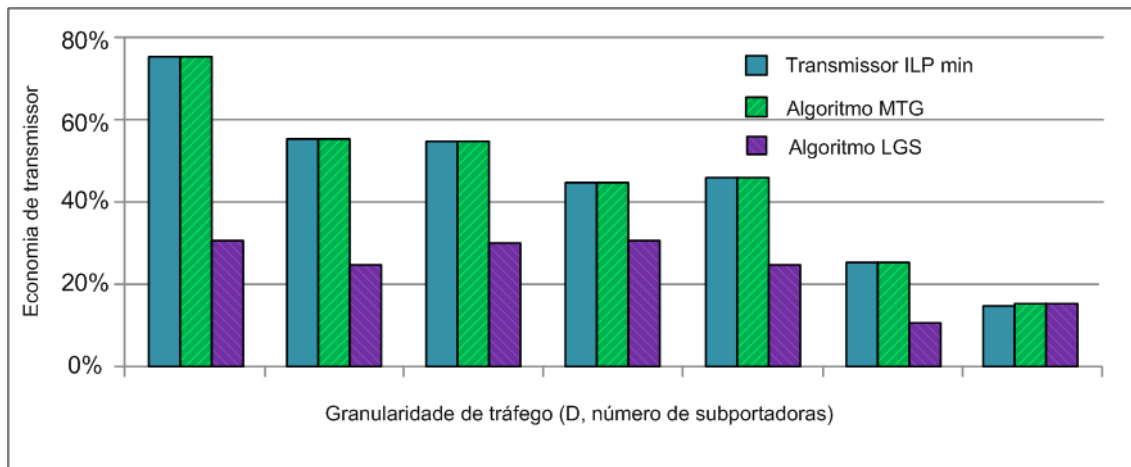


Figura 76 - Economia de transmissores na rede com 5 nós [34]

Analisando a Figura 18, que mostra o uso espectral em relação à granularidade de tráfego, pode-se observar que apenas o algoritmo ILP consegue minimizar o uso espectral, quando comparado com o cenário de Christodouloupoulos, Tomkos e Varvarigos (2010) [35]. À medida que aumenta a granularidade, a economia espectral diminui.

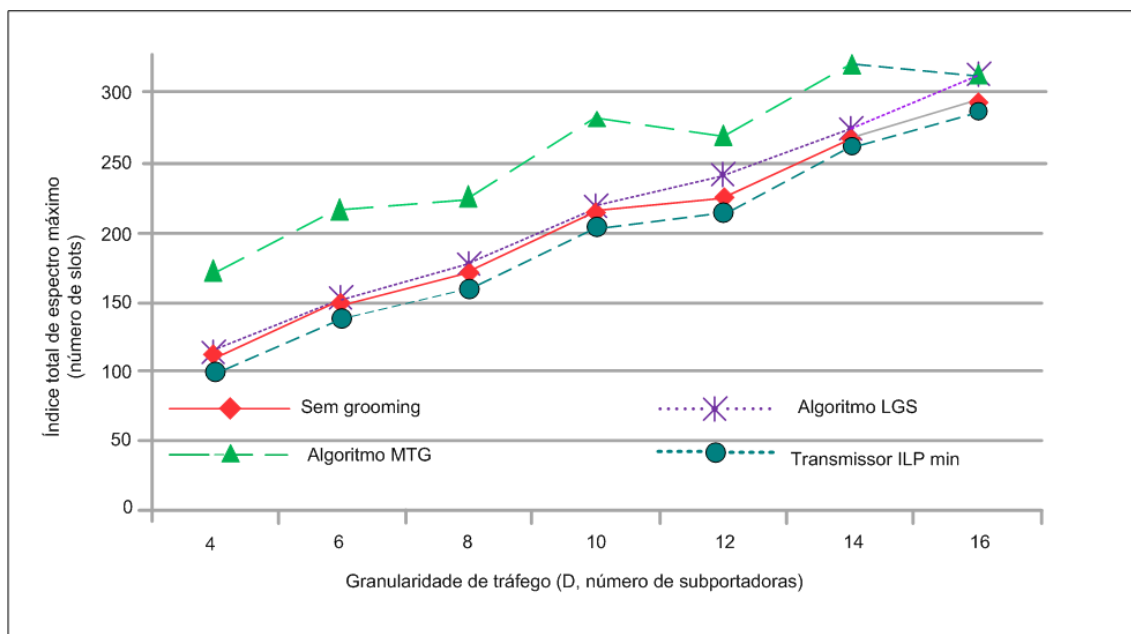


Figura 87 - Total de índices na rede com 5 nós [34]

A partir das análises realizadas acima, pode-se concluir que para minimizar o uso de transmissores e o uso espectral, o design da rede deve ser muito bem estudado. Para se ter um menor número de transmissores, que foi o caso do MTG, diversas restrições são adicionadas ao algoritmo, aumentando o uso espectral da rede. Dessa forma, um *trade-off* deve ser realizado de maneira cuidadosa, de acordo com os objetivos.

### 4.3.2 Rede grande

Para o estudo de uma rede de maiores dimensões, foi utilizada a *NSFnet* com 14 nós, que pode ser observada na Figura 19.

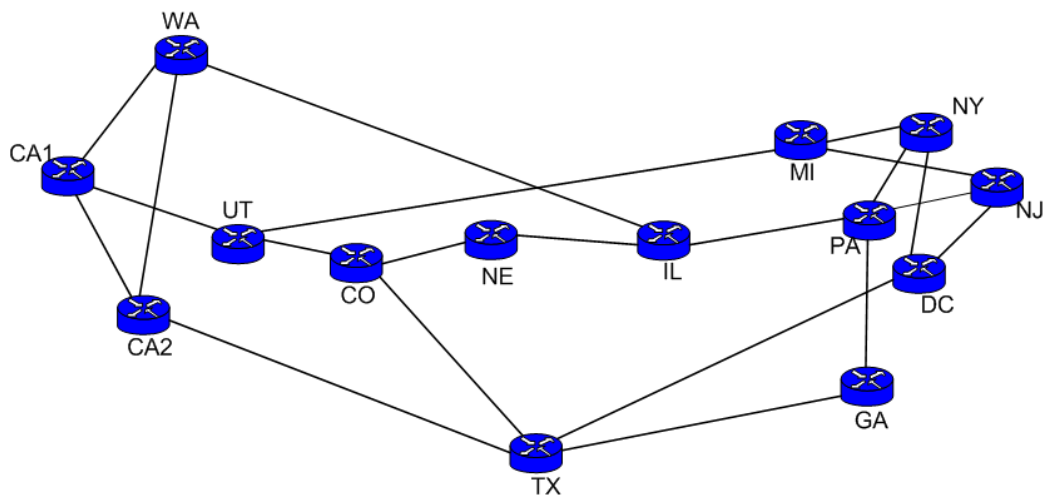


Figura 98 - Topologia da NSFnet [34]

A economia de transmissores pode ser verificada na Figura 20. Os algoritmos MTG e LGS tem economia de transmissores de até 80% e 60%, respectivamente, quando comparados com o cenário de Christodouloupoulos, Tomkos e Varvarigos (2010) [35].

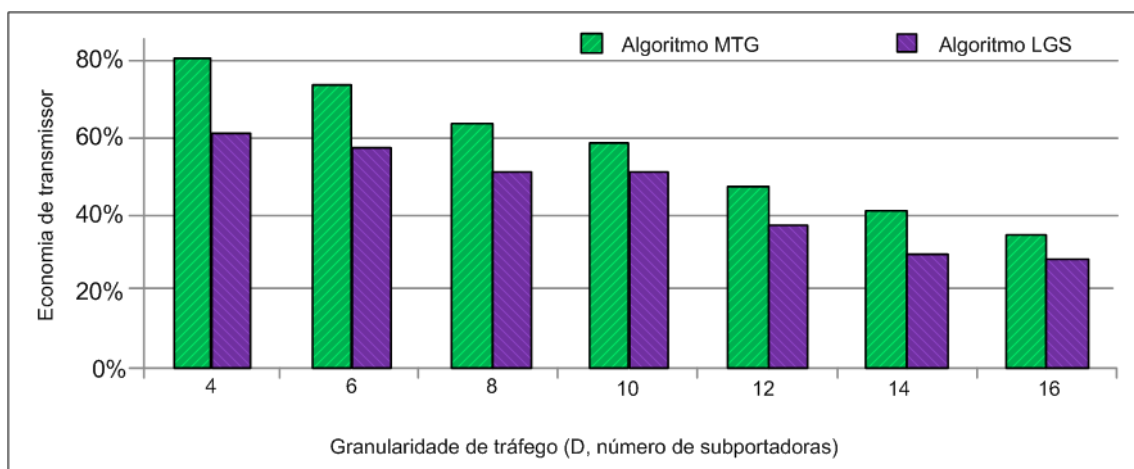


Figura 1910 - Economia de transmissores na NSFnet [34]

O uso espectral total e o total de índices podem ser observados nas Figuras 21 e 22, respectivamente. Com o uso dos algoritmos LSG e MTG, é possível diminuir o uso espectral, mas o MTG possui mais índices. Comparando com o estudo da rede de menor dimensão, os resultados são parecidos, necessitando considerar um *trade-off* entre diminuir o número de transmissores e minimizar o uso de espectro.

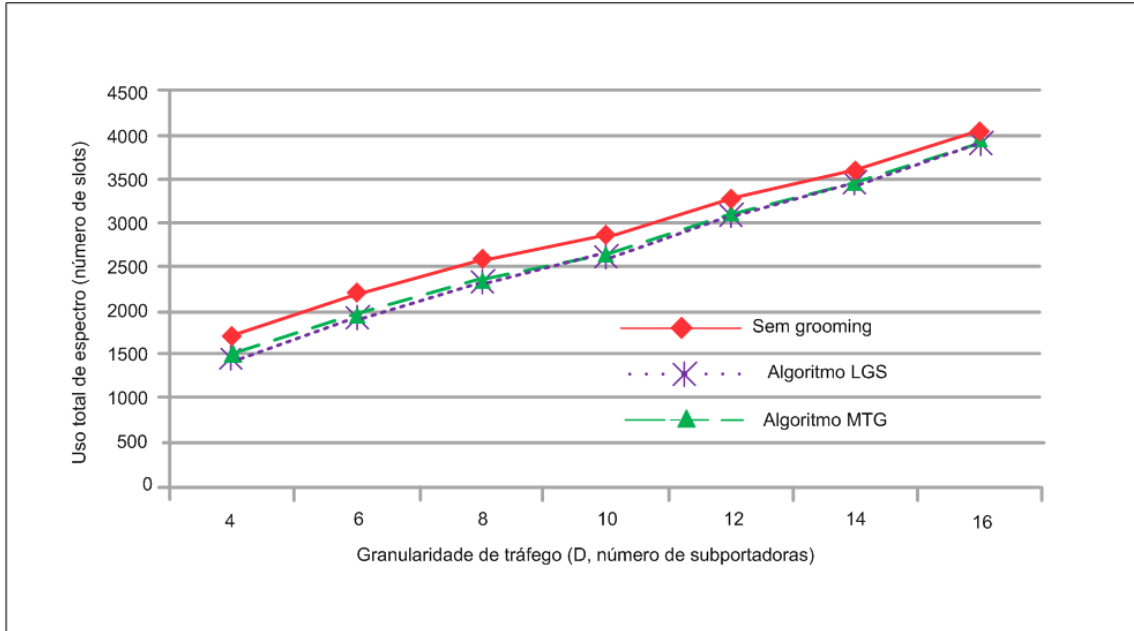


Figura 110 - Uso espectral total na NSFnet [34]

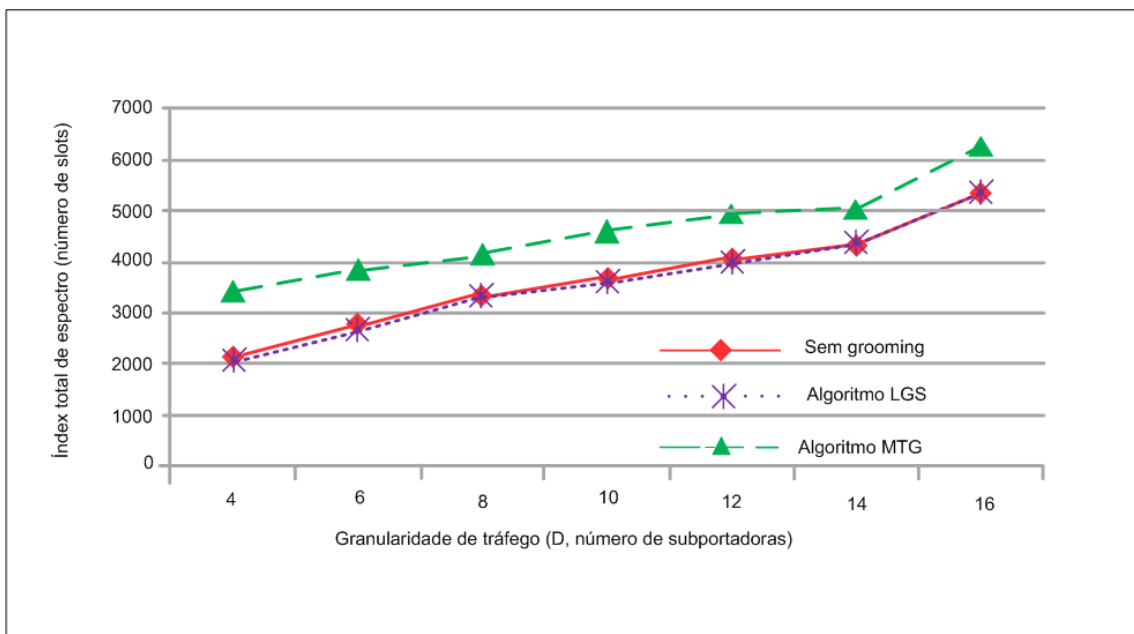


Figura 21 - Total de índices na NSFnet [34]

## CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO

### 5.1 CONCLUSÃO

O rápido crescimento do tráfego da internet e o surgimento de novas tecnologias são os motivadores para pesquisa em tecnologias de transmissão óptica por fibra com alta capacidade e custo benefício. Além destas, é exigida uma taxa de dados flexível, ágil, reconfigurável e eficiente em termos energéticos e recursos espectrais.

A técnica de transmissão OFDM óptica tem se mostrado uma tecnologia promissora para as transmissões de alta velocidade devido à sua tolerância aos efeitos dispersivos CD/PMD, à alta eficiência espectral e sua escalabilidade para taxas variáveis baseadas em tecnologias de multiplexação de subportadoras. Com base na tecnologia O-OFDM, pode ser desenvolvida uma nova arquitetura de redes ópticas elásticas com alocação espectral e taxa de dados flexíveis e escaláveis.

Diversas tecnologias, que cobrem desde a transmissão OFDM óptica até redes ópticas elásticas baseadas em OFDM foram apresentadas. É apresentada a formulação matemática dos princípios da OFDM, seu diagrama de blocos e suas funções chave que permitem o uso da tecnologia. Também foi realizada uma breve explicação das tecnologias O-OFDM.

Foi apresentada e discutida arquitetura das redes ópticas elásticas baseadas em OFDM, bem como, suas tecnologias, dentre elas: BVT, design de WXC, RSA, sobrevivência da rede, soluções de gerenciamento e controle da rede e agregação de tráfego.

Das tecnologias acima, a agregação de tráfego foi discutida com maiores detalhes, desde o seu princípio até alguns algoritmos, como o ILP e o RSA heurístico. Além das tecnologias, foi mostrado um trabalho de Zhang, De Leenher e Mukherjee (2012), nos quais testes com diversos algoritmos de roteamento e alocação de espectro (ILP, LSG, MTG) foram realizados em redes de pequenas e grandes proporções. Os resultados mostram que o agregação óptica tem grande potencial para reduzir custos das futuras redes ópticas elásticas.

### 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Além do estudo realizado nesta monografia, novas tecnologias devem ser estudadas, tanto em hardware como em software. Ressaltam-se, as dificuldades ainda encontradas na construção de BVTs e WXCs, a necessidade de algoritmos RSA

dinâmicos serem estudados, e o aprimoramento das técnicas de economia de energia e mecanismos de controle necessitam de melhorias. Sobretudo, mais pesquisas devem ser realizadas para que esta nova arquitetura de rede alcance todo o seu potencial.

## REFERÊNCIAS

- [1] CISCO. Cisco Visual Networking Index: Forecast And Methodology, 2012-2017. Disponível em: <[http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-481360\\_ns827\\_Networking\\_Solutions\\_White\\_Paper.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360_ns827_Networking_Solutions_White_Paper.html)>. Acesso em: 11 out. 2013.
- [2] GUOYING, Z. et al. A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking. *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 5. n. 1, p. 65 – 87, fev. 2013.
- [3] YANG, Q.; AI AMIN, A.; SHIEH, W. *Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications*. Nova Iorque: Springer , 2011. v. 7, p. 43 - 85.
- [4] CHANG, R. W.; GIBBY, R. A. A Theoretical Study of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme. *Transactions On Communication Technology*, IEEE, v. 16. n. 4, p. 529 - 540, ago. 1968.
- [5] SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD., Kyungki-Do Rep. of Korea, TOMOKI SAEKI. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Yokohama*, U.S. PATENT 3,488,445 –. 14 nov. 1966, 6 jan. 1970.
- [6] CIMINI, L. J. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing. *Trans. On Communications*, IEEE, v. 3. n. 7, p. 665 - 675, jul. 1985.
- [7] YAN, Q. et al. Optical OFDM Basics. In: Yang, Qi et al. *Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications*. New York: Springer, 2011. p. 43 - 85.
- [8] Van de Beek, J. J. et al. On channel estimation in OFDM systems, 45th *IEEE Vehicular Technology Conference*, Chicago, Il., v. 2, p. 815-819, jul. 1995.
- [9] ARMSTRONG, J. OFDM for Optical Communications (Invited Tutorial), *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, v. 27, n. 3, p. 525 - 526, fev. 2009.
- [10] CHAKRAVARTHY, V. et al. TDCS, OFDM, and MC-CDMA: A Brief Tutorial, *IEEE Commun. Mag.*, v. 43, n. 9, p. S11-S16, set. 2005.
- [11] LOWERY, A. J.; Du, L.; ARMSTRONG, J. *Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul WDM systems*, Proceedings OFC/NFOEC 2006, Paper PDP 39.
- [12] SHIEH, W., ATHAUDAGE, C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing. *Electronics Letters*, v. 42, n. 10, p. 587 - 589, maio 2006.
- [13] SANO, A. et al. 13.4-Tb/s (134×111-Gb/s/ch) No-Guard-Interval Coherent OFDM Transmission over 3600 km of SMF with 19-ps average PMD, Proceedings ECOC 2008, Paper Th.3.E.1.

- [14] KLEKAMP, A. et al. *Transparent WDM Network with Bitrate Tunable Optical OFDM Transponders*, Proceedings OFC/NFOEC 2010, Paper NTuB5.
- [15] JINNO, M. et al. Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies, *IEEE Commun. Mag.*, v. 47, n. 11, p. 66 – 73, nov. 2009.
- [16] GERSTEL, O. et al. Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?. *Communications Magazine*, IEEE , v. 50, n. 2, p. s12 - s20, fev. 2012.
- [17] JINNO, M. et al. Elastic and adaptive optical networks: possible adoption scenarios and future standardization aspects, *Communications Magazine*, IEEE , v. 49, n. 10, p. 164 - 172, out. 2011.
- [18] TAKAGI, T. et al. *Algorithms for maximizing spectrum efficiency in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation*, *Optical Communication (ECOC)*, 2010 36th European Conference and Exhibition, p. 1 - 3, set. 2010.
- [19] STRASSER, T. A.; WAGENER, J. L. Wavelength-Selective Switches for ROADM Applications, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, v. 16, n. 5, p. 1150 - 1157, set/out. 2010.
- [20] FRISKEN, S. Flexible and grid-less wavelength selective switch using LCOS technology, *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference*, p. 1 - 3, mar. 2011.
- [21] RYF, R. et al. Wavelength blocking filter with flexible data rates and channel spacing, *Lightwave Technology, Journal of* , v. 23, n. 1, p. 54 - 61, jan. 2005.
- [22] RYF, R. et al. Wavelength blocking filter with flexible data rates and channel spacing, *Lightwave Technology, Journal of* , v. 23, n. 1, p. 54 - 61, jan. 2005.
- [23] KOZICKI, B. et al., Filtering Characteristics of Highly-Spectrum Efficient Spectrum-Sliced Elastic Optical Path (SLICE) Network, Proceedings OFC/NFOEC 2009, Paper JWA43.
- [24] JINNO, M. et al. Demonstration of novel spectrum-efficient elastic optical path network with per-channel variable capacity of 40 Gb/s to over 400 Gb/s. *Optical Communication. ECOC 2008. 34th European Conference on*, p. 1 - 2, set. 2008.
- [25] AMAYA, N. et al. Experimental demonstration of a gridless multi-granular optical network supporting flexible spectrum switching, *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), and the National Fiber Optic Engineers Conference*, p. 1 - 3, mar. 2011.
- [26] GRINGERI, S. et al. Flexible Architectures for Optical Transport Nodes and Networks. *IEEE Commun. Mag.*, v. 48, n. 7, p. 40 - 50, jul. 2010.

[27] JINNO, M. et al. Distance adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network. *IEEE Commun. Mag.* v. 48, n. 8, p. 138 - 145. ago. 2010.

[28] ITU-T. Proposal of subjects to be discussed regarding flexible grids: SG15. Japão, jan. 2011.

[29] ITU-T. Extension of Rec. G.694.1 by a new clause to address flexible frequency grids: C1288. Alemanha, jan. 2011.

[30] CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. Routing and Spectrum Allocation in OFDM-Based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), 2010 IEEE*, p. 1 - 6, dez. 2010.

[31] SONE, Y. et al. Highly survivable restoration scheme employing optical bandwidth squeezing in spectrum-sliced elastic optical path (SLICE) network. *Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009. OFC 2009. Conference on*, p. 1 - 3, mar. 2009.

[32] ALEKSIC, S. Energy-efficient global networks and their implications. *Telecommunications, 2009. ConTEL 2009. 10th International Conference on*, p. 331 - 338, jun. 2009.

[33] LE ROUZIC, E. et al. Future optical core networks for novel applications, *Optical Communication (ECOC), 2011 37th European Conference and Exhibition on*, p. 1 - 3, set. 2011.

[34] ZHANG, G.; DE LEENHEER, M.; MUKHERJEE, B. Optical traffic grooming in OFDM-based elastic optical networks [Invited]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. v. 4, n. 11, p. B17 - B25, nov. 2012.

[35] CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E.A. Routing and Spectrum Allocation in OFDM-Based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*. p. 1, 6 - 10, dez. 2010.

[36] WANG, Y.; CAO, X.; HU, Q. Routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks. *Proceedings IEEE International Conference On Communications (ICC)*. p. 1, 5 - 9, jun. 2011.