



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

TALES VITOR NONATO

PROPOSTA E ANÁLISE DE UMA ARQUITETURA DE  
REDE ÓPTICA MULTI-GRANULAR COM TECNOLOGIA  
WDM/OCDM

---

Londrina  
2014

TALES VITOR NONATO

**PROPOSTA E ANÁLISE DE UMA ARQUITETURA DE  
REDE ÓPTICA MULTI-GRANULAR COM TECNOLOGIA  
WDM/OCDM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Renan Durand

Londrina  
2014

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da  
Universidade Estadual de Londrina.**

### **Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

N812p Nonato, Tales Vitor.  
Proposta e análise de uma arquitetura de rede óptica multi-granular com tecnologia WDM/OCDM/ Tales Vitor Nonato. - Londrina, 2014.  
122 f.: il.

Orientador: Fábio Renan Durand.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2014.  
Inclui bibliografia

1. Energia - Consumo - Teses. 2. Consumo de energia - Teses. 3. Engenharia elétrica - Teses. 4. Rede óptica - Teses. I. Durand, Fábio Renan. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU 621.3

TALES VITOR NONATO

**PROPOSTA E ANÁLISE DE UMA ARQUITETURA DE REDE  
ÓPTICA MULTI-GRANULAR COM TECNOLOGIA WDM/OCDM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Fabio Renan Durand  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –  
UTFPR

---

Prof. Dr. Fernando Ciriaco Dias Neto  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. Sidney Alves Lourenço  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –  
UTFPR

Londrina, 05 de setembro de 2014.

Dedico este trabalho a minha avó Clarice, e a meu tio Ricardo, por todo amor, carinho, dedicação, e pelos exemplos de respeito ao longo dos anos, realizando diversos esforços para contribuir, em todos os momentos possíveis com meu aprendizado.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por toda proteção em mim depositada e que me fez chegar até aqui.

Agradeço o meu orientador, Prof. Fabio Renan Durand, pela oportunidade da realização do trabalho e por todo seu valioso apoio durante seu desenvolvimento.

Agradeço a Universidade Estadual de Londrina por todo o suporte e estrutura fornecidos durante meu tempo de estudos e estadia.

Agradeço a CAPES pelo suporte financeiro.

Agradeço aos colegas Nathália S. Silva e Matheus P. Marques por toda ajuda sempre de bom grado prestada na superação de dificuldades em disciplinas e simulações.

Agradeço a toda a minha família pelo apoio e compreensão em todos os momentos da vida.

Agradeço a minha namorada Luiza R. Souza por toda a parceria e pelos bons momentos.

NONATO, Tales Vitor. Proposta e Análise de Uma Arquitetura de Rede Óptica Multigranular com Tecnologia WDM/OCDM. 2014. 122 f. Texto de dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

## RESUMO

Este trabalho propõe uma arquitetura multi-granular de comutação baseada na tecnologia híbrida Wavelength Division Multiplexing/Optical Code Division Multiplexing (WDM/OCDM). Nesta arquitetura, o tráfego de pacotes de longa duração é comutado por chaves lentas do tipo Micro Electro-Mechanical System (MEMS) Micro Electro-Mechanical System e os de curta duração serão comutados por comutadores OCDM. O principal intuito é o aumento da utilização da rede com diminuição dos custos e do consumo de energia. Os principais resultados do modelo de custo utilizado, ilustram que o chaveador óptico proposto apresenta o mesmo desempenho que arquiteturas multi-granulares oriundas da tecnologia WDM, porém com uma economia média de 35%. Além da redução de custos de implementação, é feita a otimização do consumo de potência em redes ópticas utilizando o MG-OXC proposto. O algoritmo de otimização por enxame de partículas PSO (Particle Swarm Optimization) é utilizado a fim de resolver a relação sinal-ruído mais interferência (SNIR) para regular a potência transmitida, a fim de minimizar o consumo de energia. Os principais resultados mostraram que com 100% do fator de convergência do PSO, a rede é capaz de operar dentro de uma economia de aproximadamente 10% da energia consumida em comparação com a operação da rede sem a política de otimização de potência.

**Palavras-chave:** Rede óptica Multi-granular. Modelo de custos. Otimização do consumo de potência.

NONATO, Tales Vitor. Proposal and Analysis of a Multi-granular Network Architecture with WDM/OCDM Technology. 2014. 122 p. Text of Dissertation (Masters Degree in Electric Engineer) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

## ABSTRACT

A multi-granular architecture of commutation based on hybrid technology Wavelength Division Multiplexing/Optical Code Division Multiplexing (WDM/OCDM) is showed on this paper. In this architecture the traffic of long duration packages is switched by slow keys such as Micro Electro-Mechanical Systems MEMS and the short duration packages will be switched by an OCDM router. The main intention is to increase the network utilization with lower costs and energy consumption. The main results of the used cost model, illustrate that the proposed optical switch offers the same performance as multi-granular architectures from WDM technology, but with an average cost economy of 35%. In addition to reducing implementation costs, the optimization of power consumption is made in optical networks using MG-OXC proposed. The algorithm particle swarm optimization PSO is used to solve the signal to noise plus interference ratio (SNIR) to adjust the transmitted power in order to minimize energy consumption. The main results have showed, even with 100% of the rate PSO convergence, the network is able to operate within a approximately saving of 10% of consumed power compared to network operation without power optimization policy.

**Keywords:** Multi-granular optical Network. Costs model. Optimization of power consumption.

## LISTA DE FIGURAS

1	Ambiente de rede óptica multi-granular .....	23
2	Arquitetura do MG-OXC proposto.....	25
3	Arquitetura de codificador/ decodificador bi-dimensional OCDM .....	26
4	Nó roteador bi-dimensional.....	26
5	CP e VCP.....	27
6	Chaveamento Multi-granular que suporta comutação de tráfego lento por meio de chaves MEMS e tráfego rápido por meio de chaves com tecnologia SOA.....	28
7	Sistema de comunicação WDM ponto a ponto de cinco canais.....	33
8	Representação de um OADM unidirecional .....	34
9	(a) Topologia física da rede, com os caminhos ópticos estabelecidos mostrados. (b) Topologia virtual, aquela vista pela camada cliente da camada fotônica .....	35
10	Multiplexador de adição e retirada de comprimento de onda reconfigurável .....	36
11	Nó de uma rede com chaveamento combinando um Cross-Connect Óptico e uma chave eletrônica.....	37
12	Rede óptica WDM com roteamento por comprimento de onda .....	38
13	Alternativas de arquiteturas de redes IP sobre WDM .....	40
14	Representação de um OLT contendo transponder, Mux e Demux.....	42
15	Fibra com redução da influência do OH <sup>-</sup> e a faixa espectral dos amplificadores ópticos utilizado em diversas faixas do espectro óptico de baixa perda .....	44
16	Modelo funcional para OADM, ROADM e OXC $N \times N$ .....	46
17	Arquitetura de um ROADM baseado em PLC .....	46
18	Representação funcional de um WSS .....	47
19	Optical crossconnect - OXC $N \times W$ .....	49
20	Configurações típicas de elementos de comutação: (a) crossbar, (b) Clos, (c) Benes, (d) Spanke .....	51

21	Cross-connect óptico baseado em comutação fotônica.....	52
22	Configuração MEMS 2D.....	53
23	Configuração MEMS 3D.....	54
24	Sistema ilustrativo de codificação e decodificação OCDM.....	58
25	Esquema básico de um sistema de codificação óptica utilizando tecnologia OCDM.....	59
26	Fluxo de bits em codificação temporal.....	60
27	Codificação no domínio do tempo utilizando FDL: a) Codificador FDL; b) Decodificador FDL (correlator óptico); c) Sinal codificado; d) Funções de autocorrelação e correlação cruzada.....	63
28	Domínio do tempo e frequência para um sistema com codificação de fase espectral coerente: a) Espectro do pulso estreito; b) Sequência pseudo-aleatória (PN) cuja multiplicação $-1$ e $+1$ em amplitude, corresponde ao deslocamento de fase $0$ e $\pi$ no tempo.....	64
29	Pulso espalhado codificado em fase.....	64
30	Sistema de codificação de intensidade espectral não-coerente em sistemas OCDM.....	65
31	Diagramas esquemáticos das matrizes das codewords dos códigos 2-D WH/TS.....	68
32	Caminhos virtuais de comprimentos de onda.....	69
33	Caminhos virtuais de códigos ópticos.....	69
34	Caminhos virtuais de códigos e comprimentos de onda.....	70
35	Processo de reserva dos recursos em função do tempo com processamento eletrônico dos rótulos, empregando protocolo de sinalização tipo JET.....	74
36	Visão geral dos nós de simulação.....	76
37	Visão geral da atribuição do comprimento de onda.....	77
38	Tempo de processamento em função da taxa de transmissão.....	79
39	Visão esquemática do modelo de link óptico WDM.....	80
40	Fluxograma para o algoritmo desempenho/custo.....	83
41	Amplificadores em cascata.....	87

42	Utilização do interruptor óptico para diferentes velocidades de comutação e diferentes tamanhos dos pacotes.....	91
43	Utilização da rede em função do comprimento médio dos pacotes de dados considerando a comutação rápida e lenta.....	92
44	Custos da tecnologia proposta (MG-OXC-WDM/OCDM) e OXC utilizando SOA (comutação rápida) em função do parâmetro $\alpha$ com probabilidade de bloqueio $10^{-6}$ .....	94
45	Variação da probabilidade de bloqueio em função dos custos da tecnologia OCDM e SOA, utilizando o mesmo número de comprimentos de onda.....	95
46	Custos das tecnologias MG-OXC-WDM/OCDM (Proposta) e MG-OXC-WDM em função da fração de tráfego lento.....	96
47	Topologia de rede da Finlândia.....	97
48	Topologia de rede NSFNET (EUA).....	97
49	Custos das tecnologias MG-OXC-WDM/OCDM e SOA para a rede da Finlândia em função dos diferentes tipos de tráfego .....	98
50	Comparativo de custos entre as tecnologias MG-OXC-WDM/OCDM e MGOXC- WDM para a rede da Finlândia em função dos diferentes tipos de tráfego .....	99
51	Custos das tecnologias MG-OXC-WDM/OCDM e SOA para a rede NSFNET em função dos diferentes tipos de tráfego .....	100
52	Comparativo de custos entre as tecnologias MG-OXC-WDM/OCDM e MGOXC- WDM para a rede NSFNET em função dos diferentes tipos de tráfego.....	101
53	Consumo de potência entre as tecnologias para taxa de transmissão de 10Gbps.....	102
54	Consumo de potência entre as tecnologias para taxa de transmissão de 40Gbps.....	102
55	Consumo de potência entre as tecnologias para taxa de transmissão de 100Gbps.....	103
56	Variação do consumo de potência em função da taxa de transmissão.....	104

57	Potência total consumida pela rede da Finlândia em função do fator de convergência utilizando o algoritmo PSO e o modelo de consumo de [1] .....	106
58	Potência total consumida pela rede NSFNET em função do fator de convergência utilizando o algoritmo PSO e o modelo de consumo de [1] .....	107
59	Arquitetura do nó e roteador estudado em [1] .....	112

## LISTA DE TABELAS

1	Configuração dos elementos da matriz comutadora .....	50
2	Compraração entre algumas das tecnologias de fabricação de elementos de comutação .....	52
3	Comparação entre nós empregando crossconnects ópticos × nós empregando crossconnects eletrônicos .....	56
4	Comparação entre os códigos ópticos coerentes e não-coerentes .....	59
5	Consumo de potência dos dispositivos (bidirecionais), obtidos de [1] e [87] ....	70
6	Dispositivos e custos normalizados para o modelo de rede, obtidos de [29] e [94] .....	80
7	Parâmetros de entrada para o algoritmo desempenho/custo .....	89
8	Parâmetros de variação do tráfego lento, rápido, bem como do número de comprimentos de onda lentos e rápidos .....	92

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	VISÃO GERAL	15
1.2	MOTIVAÇÃO	18
1.3	OBJETIVOS	19
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	20
1.5	PUBLICAÇÕES E SUBMISSÕES	21
<b>2</b>	<b>OXC MULTI-GRANULAR E ESTRUTURA PROPOSTA</b>	<b>22</b>
2.1	MODELO DE REDE ÓPTICA MULTI-GRANULAR	22
2.2	ARQUITETURA MG-OXC-WDM/OCDM	23
2.3	ARQUITETURA MG-OXC-WDM	27
<b>3</b>	<b>ARQUITETURA E DISPOSITIVOS DAS REDES ÓPTICAS</b>	<b>29</b>
3.1	A EVOLUÇÃO DO SISTEMA WDM	29
3.1.1	Redes de primeira geração	30
3.1.2	Redes de segunda geração	31
3.1.3	Redes de terceira geração	35
3.2	CARACTERÍSTICAS DAS REDES WDM	39
3.3	ALTERNATIVAS DE COMUTAÇÃO	41
3.4	DISPOSITIVOS DAS REDES ÓPTICAS	42
3.4.1	Optical Line Terminal - OLT	42
3.4.2	Amplificadores ópticos	43
3.4.3	OADM e ROADM	45
3.4.4	OXC	48
3.4.5	Comutação elétrica	49
3.4.6	Comutação fotônica	51
3.4.7	MEMS 2D/3D	53
3.4.8	SOA	54
3.4.9	Comutação elétrica × Comutação fotônica	55

3.5	TECNOLOGIA OCDM .....	55
3.5.1	Redes OCDM.....	59
3.5.2	Codificação no domínio do tempo.....	60
3.5.3	Os códigos ópticos ortogonais - OOC .....	62
3.5.4	Codificação no domínio da frequência.....	63
3.5.5	Codificação híbrida em tempo e frequência (W/T) .....	66
3.6	REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS WDM/OCDM .....	68
3.7	CONSUMO DE POTÊNCIA DOS DISPOSITIVOS.....	70
4	METODOLOGIA .....	73
4.1	OXCS MULTI-GRANULARES.....	73
4.1.1	Metodologia de análise.....	75
4.1.2	Modelo de Alocação de tráfego .....	76
4.1.3	Modelo de custos para a camada óptica.....	79
4.2	ALGORITMO PROPOSTO PARA O CALCULO DE CUSTOS .....	82
4.3	MODELO DE CONSUMO DE POTÊNCIA DA REDE .....	84
4.4	METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE POTÊNCIA .....	85
5	RESULTADOS.....	89
5.1	ANÁLISE DE DESEMPENHO DA REDE.....	90
5.2	CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO DOS NÓS MG-OXC .....	93
5.3	ANÁLISE DE CUSTOS DE REDES ÓPTICAS COM MG-OXC .....	96
5.3.1	Custos da Rede da Finlândia .....	98
5.3.2	Custos da Rede NSFNET .....	99
5.4	ANÁLISE DO CONSUMO DE POTÊNCIA DOS NÓS MG-OXC.....	101
5.5	OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE POTÊNCIA DA REDE .....	104
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS .....	109
6.1	CONCLUSÕES .....	109
6.2	PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111

<b>APÊNDICE A - APLICAÇÃO DO PSO PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA.....</b>	<b>113</b>
<b>Referências.....</b>	<b>116</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O constante aumento de tráfego em função de recursos de multimídia e comunicação de dados, fez surgir a necessidade de um aumento da capacidade das redes, levando estas a passarem por processos evolutivos. Observou-se que a transmissão ponto-a-ponto ou em anel não era mais suficiente, pois ocorriam muitas perdas de informações e inviabilizavam os serviços da camada de aplicação do cliente final. Desta forma, tornou-se necessário o desenvolvimento de redes ópticas que atuem de forma flexível e dinâmica para compartilhamento de largura de banda de forma eficiente e com custo econômico viável.

### 1.1 VISÃO GERAL

Os primeiros sistemas de transmissão ópticos utilizavam padrões altamente proprietários, sendo implementados inicialmente em redes públicas de telefonia. As diferentes tecnologias adotadas pelos fornecedores dificultavam a interconexão de novos equipamentos e tornavam o custo de instalação e manutenção bastante elevado, existindo a necessidade de se criar um padrão para os equipamentos, interfaces e modos de conexão. As redes ópticas do tipo síncronas SONET (*Synchronous Digital Hierarchy*) foram a solução adotadas pelo Instituto Nacional de Padronização Americano ANSI (*American National Standards Institute*) como referência para as redes ópticas [2]. Após isso, outras linhas de pesquisa visando compatibilizar a transmissão mundial foram iniciadas.

A evolução das redes ópticas é caracterizada por três gerações distintas. As redes ópticas de primeira geração, são caracterizadas pela substituição dos meios de transmissão existentes, normalmente cabos coaxiais, por fibras ópticas. As redes de segunda geração já dispõem de fibras com capacidade de suportar a multiplexação de vários canais WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), possibilitando que diferentes usuários compartilhassem a mesma fibra. Os avanços na tecnologia de multiplexação de comprimentos de onda WDM contribuíram para o desenvolvimento de redes ópticas do tipo malha, capazes de fazer o desvio de caminho de alguns comprimentos de onda no nó, procurando seguir a melhor rota baseada em fatores como distância, qualidade, custo e confiabilidade de rotas específicas. Este tipo de tecnologia de rede acabou por receber a denominação de redes de terceira geração. Estas redes suportam diferentes demandas de taxa de transmissão, frequência de utilização, com roteamento e comutação no domínio óptico aliado a um baixo tempo de configuração, provendo o transporte de informações por meio de canais ópticos baseados em comprimentos de onda (*lightpaths*) [3].

Na tecnologia WDM, o sinal é codificado no domínio elétrico e os processos de multiplexação e demultiplexação são feitos no domínio óptico. Cada canal é diferenciado por um comprimento de onda específico. Entretanto, canais ópticos baseados em comprimentos de onda apresentam baixa granularidade, pequena eficiência de utilização e elevado custo para aplicações em redes de acesso e/ou metropolitanas [3], [4].

Outra tecnologia existente para acomodar o tráfego heterogêneo das redes ópticas é a OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*) e o OCDM (*Optical Code Division Multiplexing*) [3]. A tecnologia OCDMA teve seu desenvolvimento motivado pela possibilidade da obtenção de capacidade de acesso assíncrono e segurança na transmissão de informação, além da realização de uma rede sem a necessidade de controle centralizado. Outra importante motivação é a utilização da codificação e decodificação no domínio óptico. Assim podem-se obter redes totalmente ópticas que potencialmente alcancem uma taxa de transmissão agregada de Tbps [5].

Em sistemas OCDMA cada nó transmissor enviará a informação com o código do nó receptor de interesse. No nó receptor, ocorrerá o processo de correlação entre todos os códigos que foram transmitidos e o código alocado para este receptor [4]. Os códigos ópticos podem ser classificados em coerentes e não-coerentes. Os códigos coerentes empregam modulação em amplitude e fase, desta forma, são bipolares  $(-1, 1)$  e ortogonais, ao passo que os não coerentes utilizam modulação apenas em amplitude, são unipolares  $(0, -1)$  e pseudo-ortogonais. Os códigos coerentes apresentam maior relação sinal interferência SIR (*Signal interference Ratio*), porém sua complexidade tecnológica é maior [4], [6]. Os sistemas OCDMA não-coerentes apresentam codificação espectral de amplitude, espalhamento temporal e codificação bi-dimensional 2D [7]. Os códigos 2D são compostos por espalhamento temporal e salto em frequência (comprimento de onda) e são amplamente estudados em função de apresentarem desempenho e flexibilidade maiores em relação aos demais códigos não coerentes [8].

Para que as redes pudessem evoluir, foi necessário o emprego de dispositivos de adição e retirada de comprimentos de onda que pudessem ser controlados remotamente. Este dispositivo é conhecido como ROADM (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*). Porém, a busca por maior flexibilidade das redes, levou ao desenvolvimento de dispositivos denominados OXCs (*optical crossconnects*) que também permite a reconfiguração óptica sob demanda, porém são mais indicados para redes com a topologia em malha por serem mais robustos e suportarem grande número de comprimentos de onda.

O responsável pela capacidade de roteamento de um ROADM ou de um OXC, é sua matriz de comutação. Esta matriz pode ser comutada no domínio elétrico ou óptico.

Dentre as tecnologias de comutação existentes, duas são de grande importância neste trabalho: A MEMS (*Micro Electro-Mechanical System*) e a SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*). No caso da primeira, tratam-se de pequenos espelhos feitos por substrato de silício. O modelo menos complexo é o de dois estados, ou MEMS 2-D. A denominação 2-D deve-se ao fato de seus espelhos possuírem apenas dois estados: ativados (que refletem a luz para a porta de saída desejada), e desativados (que não refletem). O modelo mais sofisticado, e por sinal mais indicado para redes robustas, é o MEMS 3-D. Esta configuração, garante que seus espelhos se movimentem em todas as direções, com um tempo de comutação de aproximadamente 10 ms [9].

Os amplificadores ópticos SOA, também podem ser utilizados como portas comutadoras *on-off*. Uma grande vantagem de se empregar a comutação por esta tecnologia é que seu bloqueio/liberação leva cerca de 1 ns [9] o que é considerado um tempo ideal para comutação óptica. Entretanto, esta tecnologia não está totalmente consolidada pois os custos de implementação são demasiadamente altos [10].

A busca pela capacidade e escalabilidade das redes ópticas, uniu as duas tecnologias (WDM e OCDM) e deu origem às redes óptica híbridas. Este tipo de arquitetura de rede, tem como característica, o emprego de duas ou mais tecnologias de comutação, e representam uma solução satisfatória na alocação de tráfego e redução de custos das tecnologias. Desta forma, a utilização da tecnologia híbrida WDM/OCDM como camada de transporte pode aumentar a flexibilidade e granularidade das redes ópticas comutadas por circuitos, pacotes ou rajadas ópticas, além de possibilitar a utilização dos comprimentos de onda e códigos ópticos [11].

Além da preocupação em se aumentar a eficiência de utilização das redes ópticas, linhas de pesquisa vêm trabalhando em estabelecer a redução do consumo de potência nestas redes. Observa-se que muitos trabalhos tem se preocupado em desenvolver ou melhorar algoritmos existentes para alocação de potência e otimização.

O problema de controle de potência óptica foi recentemente estudado no contexto das redes de acesso, com o objetivo de resolver o problema de *near-far* [12], [13] e estabelecer os requisitos de QoS na camada física [14], [15]. Em [12], o impacto de controle de potência no acesso de protocolo aleatório foi investigada. Em [13], o efeito do problema *near-far* e uma revisão detalhada do controle de potência foram apresentados, incluindo o uso de algoritmos distribuídos. Por outro lado, em [14], [15] o conceito de que usuários diferentes devem transmitir em diferentes níveis de potência foi aplicado. Níveis de potência distintos foram obtidos com atenuadores de potência [16], codificadores/decodificadores [17], e também transmissores ajustáveis [15]. Além disso, a seleção ideal dos parâmetros do sistema, tais como a potência

transmitida e a taxa de informação iria melhorar suas performances [14], [18], [19]. Além disso, recentemente, pesquisas têm mostrado a utilização de alocação de recursos e otimização de algoritmos, como pesquisa local, *Simulated Annealing*, GA, PSO (*Particle Swarm Optimization*), ACO (*Ant Colony Optimization*) e Teoria dos Jogos para regular a potência transmitida, e o número de usuários ativos, a fim de maximizar o *throughput* agregado das redes ópticas [20], [21]. No entanto, a complexidade e melhor eficiência nas estratégias apresentadas, são aspectos a serem melhorados. Por outro lado, a alocação de recursos não vem sendo amplamente investigada considerando os aspectos de eficiência energética. Esta questão tornou-se primordial uma vez que o consumo de energia é dominada pelo WDM/OCDM devido à grande quantidade de elementos de rede passiva [22], [23].

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A motivação deste trabalho, vem do fato de que o grande tráfego heterogêneo das redes ópticas, como por exemplo, o tráfego IP (*Internet Protocol*) e *Ethernet* em redes locais, redes metropolitanas MAN (*Metropolitan Area Network*) e redes de longo alcance WAN (*Wide Area Network*) diminuem a eficiência de utilização destas redes. Esta baixa eficiência ocorre pois este tipo de tráfego é caracterizado por pacotes de dados com pequeno tamanho, e transporte instantâneo com baixa latência. A consequência deste tipo de tráfego, é que o índice de utilização da rede é reduzido, o que implica em sua baixa eficiência. Esta situação se agrava se o comprimento do pacote de dados é comparável ao tempo de comutação, que neste caso, é determinado pelo ajuste dos OXCs e o tempo de reserva de comprimentos de onda [24]. A solução ideal seria que as redes ópticas fossem totalmente transparentes, e utilizassem comutadores com altíssimas velocidades (a tecnologia SOA, por exemplo). Entretanto, uma arquitetura de rede com estas características, é totalmente inviável do ponto de vista econômico, devido ao alto custo de implementação destes elementos conforme já mencionado.

Algumas linhas de pesquisa tem se empenhado em propor arquiteturas de redes ópticas que possuem um bom desempenho, e ao mesmo tempo tenham seus custos de implementação reduzidos. Uma boa alternativa encontrada e que vem sendo amplamente estudada, são as redes ópticas híbridas [25], [9]. A proposta destas pesquisas, é desenvolver roteadores que utilizam atribuição de comprimento de onda e decidem como o sinal é comutado. Em [9], por exemplo, é proposto um roteador que associa elementos de comutação MEMS e SOA. Neste trabalho, é proposto que o algoritmo de controle da rede faça a diferenciação entre tráfego lento e tráfego rápido, por meio da inspeção do tempo decorrente entre o cabeçalho de informações e o pacote de dados a ser transmitido. Assim, os pacotes de curta duração (rápido), são direci-

onados para as chaves rápidas enquanto os de longa duração (lento) serão direcionados para as chaves lentas. Também pôde-se verificar que a inclusão de alguns elementos rápidos de comutação melhora o desempenho da rede e torna-se muito mais viável do que uma rede composta integralmente por elementos rápidos de comutação.

Assim, esta pesquisa segue a mesma linha do trabalho destes autores. A ideia é propor outra alternativa de roteador, na tentativa de minimizar os custos de implementação, e mantendo a mesma qualidade de transmissão. O trabalho destes autores servem como apoio para este trabalho no sentido de se estabelecer comparativos de resultados, e também comparar ambas as propostas.

Outro tópico que vem despertando interesse de muitos autores em suas linhas de pesquisa, é com a eficiência energética das redes ópticas. As pesquisas sobre eficiência energética surgiram da necessidade de se reduzir despesas com energia elétrica e dissipação de calor associado a potência dos dispositivos, e também a emissão de gases do efeito estufa. Assim, também faz parte da linha de pesquisa deste trabalho identificar o quanto de potência é consumido nos dispositivos utilizados para compor a rede, para que desse modo tenha-se condições de propor um novo tipo OXC, aliando um bom desempenho a um menor custo e também reduzindo o consumo de potência da rede.

Nas referências sobre otimização de potência pesquisadas, foram encontrados algoritmos utilizados para fazer a alocação de recursos da rede, de modo a minimizar seu consumo de potência. Assim, após a análise de custo/desempenho do comutador proposto, será feita a otimização de uma rede roteada por ele por meio do algoritmo PSO, no intuito de que ela possa ser melhorada do ponto de vista de custo e também de sustentabilidade.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é propor uma arquitetura de comutador óptico multi-granular, baseado na tecnologia WDM/OCDM, chamado de MG-OXC-WDM/OCDM. Os algoritmos de controle da rede realizarão o escalonamento do tráfego lento e rápido para definir o tipo de comutação mais adequada aos diferentes tipos de tráfego da rede. O intuito é que o tráfego lento seja comutado por meio de MEMS e o tráfego rápido seja comutado por meio de um roteador OCDM. O desempenho de um comutador MG-OXC-WDM encontrado na literatura será comparado ao MG-OXC-WDM/OCDM em termos custo e eficiência energética. Assim, será desenvolvido um modelo de custo do comutador MG-OXC-WDM/OCDM baseado em CapEx (*Capital Expenditure*) para comparação com o comutador MG-OXC-WDM. Além da redução de custos, outro aspecto de fundamental importância na implementação de redes

ópticas, é a preocupação com a eficiência energética. Nesse contexto, além da proposta de um novo modelo de comutador, também faz parte dos objetivos deste trabalho fazer um levantamento sobre o consumo de potência dos dispositivos utilizados na confecção das redes ópticas, bem como determinar o consumo total de potência da rede utilizando modelos existentes, de modo que se possa otimizá-la. Desse modo, procedimentos de otimização baseados em otimização por enxame de partículas PSO, serão utilizados investigados afim de resolver de forma eficiente a otimização de consumo de energia em redes ópticas multi-granulares sob restrições de QoS (*Quality of Service*).

#### **1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A pesquisa e os resultados obtidos nesse trabalho estão divididos da seguinte maneira:

O capítulo 2 apresenta o conceito de rede óptica multi-granular e também a arquitetura do MG-OXC-WDM/OCDM proposto com o objetivo de ilustrar suas principais características.

O capítulo 3 traz um referencial teórico sobre as redes ópticas, um pouco de seu histórico e seus dispositivos. Nele, são analisadas as características da tecnologia WDM, bem como os dispositivos utilizados nestas redes. Nesse capítulo é ilustrada a tecnologia OCDM, os códigos ópticos e também as arquiteturas do MG-OXC-WDM e MG-OXC-WDM/OCDM proposto. Por fim, é feito um levantamento sobre o consumo de potência dos dispositivos de redes ópticas de interesse.

O capítulo 4 destina-se a trazer a metodologia de pesquisa, onde será abordado o modelo de custo utilizado para esta pesquisa, e será feita a análise de desempenho da rede. Este capítulo também expõe um modelo de consumo de potência que será utilizado nas simulações para fins de comparação com os resultados obtidos com o algoritmo PSO, que será utilizado para otimização da rede.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos das simulações, e ilustram com os comparativos de desempenho, custo e otimização das tecnologias estudadas, bem como uma breve discussão para cada um dos resultados.

No capítulo 6, serão apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização do trabalho, e também as perspectivas para trabalhos futuros que se relacionam ao tema de pesquisa.

## 1.5 PUBLICAÇÕES E SUBMISSÕES

Esta pesquisa possibilitou o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- Tales Nonato, Fábio Renan Durand, Marcelo Luis Francisco Abbade e Taufik Abrão. **“Power Consumption Optimization in Multi-Granular Optical Networks with Particle Swarm Intelligence,”** em *International Microwave and Optoelectronics Conference* - IMOC 2013, 4-7 de agosto de 2013, Rio de Janeiro, RJ.
- Tales Vitor Nonato, Taufik Abrão e Fabio Renan Durand. **“Proposta e Análise de Uma Arquitetura de Rede Óptica Multi-granular com Tecnologia WDM/OCDM”** - Submetido para a revista Semina em 24/04/2014.
- Tales Vitor Nonato e Fabio Renan Durand. **“Power Consumption and Cost Analysis in Hibrid Multi-Granular Optical Network”** - Em fase final de preparação.

## 2 OXC MULTI-GRANULAR E ESTRUTURA PROPOSTA

Este capítulo tem por objetivo apresentar a estrutura e as características de uma rede óptica multi-granular que servirá de apoio neste trabalho. Em seguida, será apresentada a proposta deste trabalho. Trata-se de um MG-OXC WDM/OCDM que tem como objetivo aumentar a utilização da rede e atender aos diferentes requisitos de QoS por ela requeridos.

### 2.1 MODELO DE REDE ÓPTICA MULTI-GRANULAR

Uma rede com comutação óptica multi-granular é capaz de suportar de forma dinâmica os comprimentos e sub-comprimentos de onda das granularidades de sua largura de banda com diferentes níveis de QoS. Este termo significa boa qualidade dos serviços de rede para os usuários finais. Mais especificamente, se é dito que uma rede tem QoS ou fornece QoS, significa que a rede é capaz de ir ao encontro às necessidades das aplicações dos usuários finais de um modo satisfatório. Qualquer coisa que pode afetar a percepção do usuário final na qualidade do serviço de rede, como por exemplo, confiabilidade, segurança, política de roteamento, engenharia de tráfego, todos se enquadram no escopo do QoS [26].

De modo a suportar diferentes níveis de QoS, a rede utiliza uma ou mais das três tecnologias básicas de comutação em redes WDM: a comutação por circuitos ópticos OCS (*Optical Circuit Switching*), a comutação por pacotes ópticos OPS (*Optical Packet Switching*) e a comutação por rajadas ópticas OBS (*Optical Burst Switching*).

Para que a migração de tecnologia de comutação de uma rede óptica ocorra de forma satisfatória, seja com comprimento de onda estritamente granular (OCS) para outra com sub-comprimento de onda (OBS ou mesmo OPS), ou ainda uma rede híbrida do tipo OCS/OBS, é necessário que se considere o uso de tecnologias de comutação com velocidades que variam de mili até nanosegundos. A Figura 1, ilustra uma arquitetura de rede óptica multi-granular.

A rede óptica ilustrada na Figura 1, é dotada de comutadores lentos e rápidos para acomodar o tráfego heterogêneo. A reserva de recursos dela pode ser feita pelo envio de um cabeçalho de informações, e fica por conta do mecanismo de controle que se faça a transmissão dos dados pelos comutadores lentos (normalmente circuitos e rajadas longas) ou pelos rápidos (pacotes e rajadas curtas). No primeiro caso, as chaves são dinamicamente reconfiguradas para que quando o conjunto de dados de longa duração chegue, seja encaminhado para a porta de saída adequada. No outro caso, os dados de curta duração são encaminhados por meio das

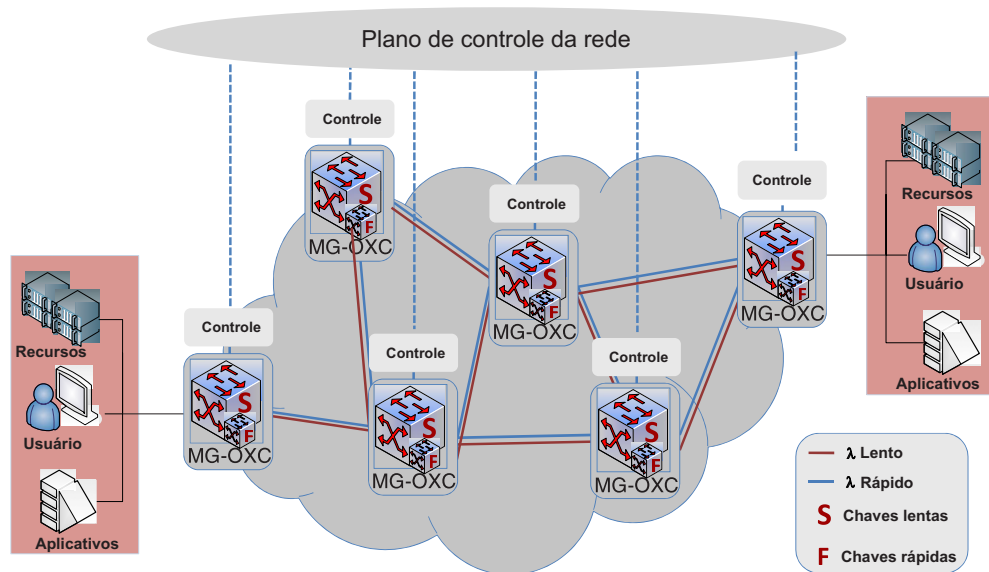


Figura 1: Ambiente de rede óptica multi-granular.

chaves rápidas, seja por conexão direta dos comprimentos de onda de entrada, ou ainda utilizando conexões já estabelecidas pelo interruptor lento afim de evitar novas reconfigurações. Este modelo de rede, serve como base para este trabalho.

## 2.2 ARQUITETURA MG-OXC-WDM/OCDM

A proposta deste trabalho, é criar um modelo de OXC que atenda às necessidades de comutação da rede óptica multi-granular descrita acima. O intuito desta arquitetura proposta, é que o dispositivo seja capaz de propiciar a comutação por circuitos, por pacotes e por rajadas, com bons níveis de QoS mesmo que se aumente o número de usuários da rede. Também é esperado, que este OXC seja capaz de aumentar a utilização da rede ao mesmo tempo em que reduz a probabilidade de bloqueio dos sinais a serem transmitidos.

Em [9] e [25], foi proposto um MG-OXC-WDM que utiliza chaves comutadoras do tipo MEMS associadas a chaves comutadoras do tipo SOA, considerando que uma pequena quantidade de comutadores rápidos associados aos comutadores lentos, pudessem melhorar o desempenho da rede. Em ambos os trabalhos destes autores, foi proposto que o plano de controle da rede classificasse o tráfego de duas maneiras: as rajadas ópticas de longa duração, formariam o chamado tráfego lento ao passo que as rajadas de pequeno tempo de duração formariam o tráfego rápido. O intuito é que o tráfego lento seja roteado pelos comutadores do tipo MEMS, pois são mais baratos e possuem um tempo de comutação adequado a esse tipo de tráfego. Por outro lado, a função dos comutadores SOA nesta proposta, foi rotear os pacotes de informação que possuem baixo tempo de duração. Isso porque o tempo de comutação destas chaves,

é bem menor em relação as chaves do tipo MEMS, sendo adequados ao tráfego de pequeno tamanho. Uma desvantagem da tecnologia de comutação do tipo SOA, é que sua tecnologia de fabricação precisa ser flexibilizada, pois ainda possui baixa escalabilidade, resultando em custos elevados de implementação [27]. Os principais resultados obtidos em [9], mostraram uma eficiência maior da rede e redução da probabilidade de bloqueio de rajadas. Além de conseguir melhores resultados em relação a eficiência da rede, também era objetivo estabelecer uma relação custo/benefício tomando cuidado em se determinar a quantidade de comutadores SOA, de modo a não tornar o custo da proposta feito, demasiadamente elevado. O modelo de custos adotado foi o CapEx, que também será utilizado neste trabalho.

A arquitetura de MG-OXC-WDM/OCDM proposta nesse trabalho, é semelhante ao citado [9], [25]. É de responsabilidade do controle da rede que se faça a atribuição de comprimentos de onda para definição do tráfego lento e rápido. Do mesmo modo, o tráfego lento será roteado por comutadores do tipo MEMS que possuem tempo de comutação mais baixo. A diferença da proposta aqui feita, é que os comprimentos de onda que agregam pacotes de pequena duração, classificados como rápido, serão codificados e direcionados por meio de um roteador OCDM, cujo roteamento é feito apenas no tempo em que a luz leva para ser processada. O tempo de processamento da luz é muito baixo, sendo comparado ao tempo de estabelecimento dos comutadores SOA [24], [28]. O principal intuito de propor um OXC com essas características, é que o custo de implementação da tecnologia OCDM como roteador, é mais baixo em relação a tecnologia SOA [29]. Esta abordagem traz duas importantes vantagens: uma maior eficiência da rede, pois com o emprego de comutadores rápidos sua utilização é maximizada, e também os custos totais de implementação da rede são reduzidos.

Devido ao fato do OXC proposto agregar a tecnologia WDM por meio das chaves MEMS, e a OCDM para o tráfego rápido, em um comutador multi-granular, ele será chamado de MG-OXC WDM/OCDM. A Figura 2, apresenta o MG-OXC WDM/OCDM proposto.

Faz parte da proposta deste trabalho fazer um comparativo do MG-OXC WDM/OCDM aqui proposto com o MG-OXC WDM proposto em [25]. Para tanto, a análise de desempenho das três tecnologias de comutação envolvidas nos dois comutadores será avaliada e testada por meio de simulações. Também será feito um levantamento de custos para estas tecnologias de forma isolada, e também aplicadas aos dois modelos de OXCs envolvidos nesta pesquisa. O intuito, é demonstrar que o OXC proposto, possui o mesmo desempenho que o MG-OXC-WDM, porém com uma economia de recursos e custos.

O emprego da tecnologia OCDM possui vantagens tais como, controles simplificados, acesso aleatório para toda a largura de banda, e alocação de largura de banda flexível.

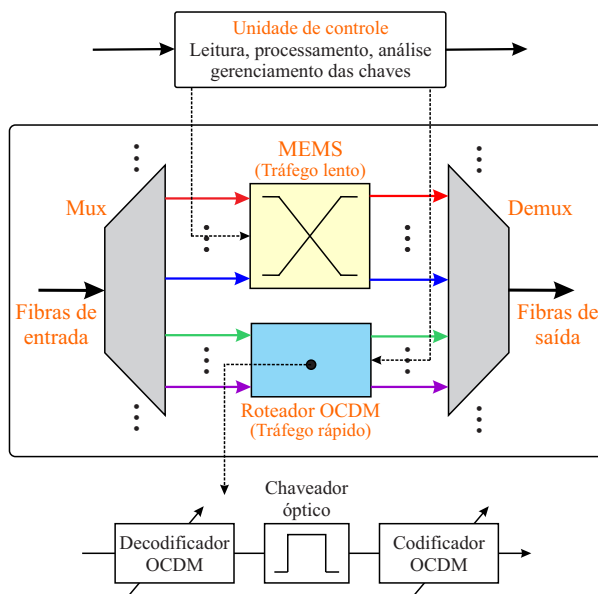


Figura 2: Arquitetura do MG-OXC proposto.

Por estes benefícios, apresenta-se como bom candidato para redes de área local. Em sistemas 2-D WHTS (*Wavelength - Hopping Time - Spreading*) OCDM, os pulsos ópticos são codificados tanto no domínio do tempo, como no domínio de comprimentos de onda simultaneamente. Os códigos ópticos podem ser representados como matrizes, com o tempo e o comprimento de onda em dois eixos.

Uma das tecnologias utilizadas, é conhecida por AWG (*Array Waveguide Grating*). Trata-se de um dispositivo (tipicamente acoplado com fibra), que pode separar ou combinar sinais com diferentes comprimentos de onda. Geralmente é construído de tal modo, em que a luz vinda de uma fibra de entrada entra seção multimodo de guia de onda, e em seguida propaga-se através de vários guias de ondas de modo único com uma segunda seção multimodo, daí então para as fibras de saída. A filtragem de comprimentos de onda é baseada em um efeito de interferência. Qualquer componente da frequência de entrada propaga-se através de todas as guias de ondas de modo único, e a saída em qualquer dos canais resulta da sobreposição (interferência) de todas essas contribuições. A Figura 3 ilustra de forma esquemática esta implementação.

As linhas de atraso ópticas permitem que o decodificador seja sintonizável. A posição dos comprimentos de onda dentro do intervalo de *chip* pode ser alterado afim de se criar um código diferente na mesma família de códigos. Uma abordagem mais completa sobre códigos ópticos será feita mais adiante. Enquanto o decodificador espalha os comprimentos de onda no tempo durante o período de *chip*, linhas de atraso são definidas para reorganizar os códigos. Os comprimentos de onda são realinhados para criar um pico de auto-correlação. Todos os códigos

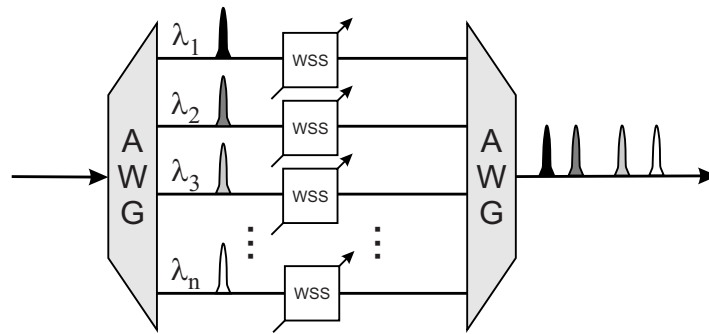


Figura 3: Arquitetura de codificador/decodificador bi-dimensional OCDM.

que não forem compatíveis com receptor, serão interpretados como um ruído e assim classificados como interferência de múltiplo acesso (MAI - *Multiple Access Interference*). Todos os sistemas OCDM são limitados em seu tempo pela MAI. Afim de se eliminar este ruído uma chave óptica ajustada a um limiar de tempo é instalada antes do codificador. Todos os sinais que se situam abaixo do limiar ou fora da janela de tempo contendo o pico de auto-correlação é eliminado antes da detecção.

O principal elemento do bloco roteador OCDM é um roteador conversor de código que é exibido na Figura 2 [23]. Cada conversor de código é constituído por um decodificador sintonizável cuja função é selecionar um dos códigos de entrada, por um chaveador óptico que testa o *bit* e recupera o pico de auto-correlação que consiste em  $W$  comprimentos de onda, e também por um codificador re-sintonizável, para codificar os dados e enviá-los na próxima ligação. A Figura 4 ilustra um nó roteador OCDM, que pode ser utilizado como alternativa aos comutadores SOA [23].

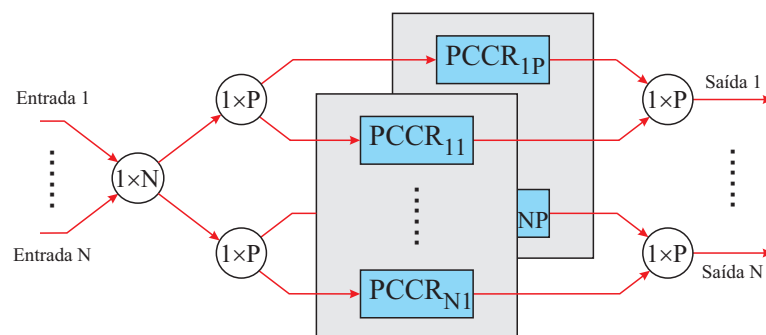


Figura 4: Nó roteador bi-dimensional

O nó roteador mostrado na figura, utiliza conversores de código em paralelo, descritos na figura como PCCR (*Parallel Code Converter Router*). Cada um dos PCCRs é pré-conectado a uma saída específica, e executa o roteamento selecionando um código específico, a partir do tráfego de entrada. O Nó, tem  $N$  entradas e  $N$  saídas, onde  $N$  é o grau do nó. Um acoplador estrela direciona o tráfego combinado de entrada para todos os PCCRs até  $P$ ,

onde  $P$  é o número de conversores. Os PCCRs são então combinados para um dos *links* de saída. Por exemplo, Os PCCRs para a saída 1, são mostrados como  $PCCR_{11}$  a  $PCCR_{1P}$ , onde o  $PCCR_{ij}$  corresponde ao usuário  $j$  sendo dirigido para a saída  $i$ . O número máximo de canais que podem ser multiplexados em uma ligação de saída é, portanto,  $P$ . A combinação decodificador/chaveador realiza seleção de código e roteamento. O codificador realiza atribuição de código.

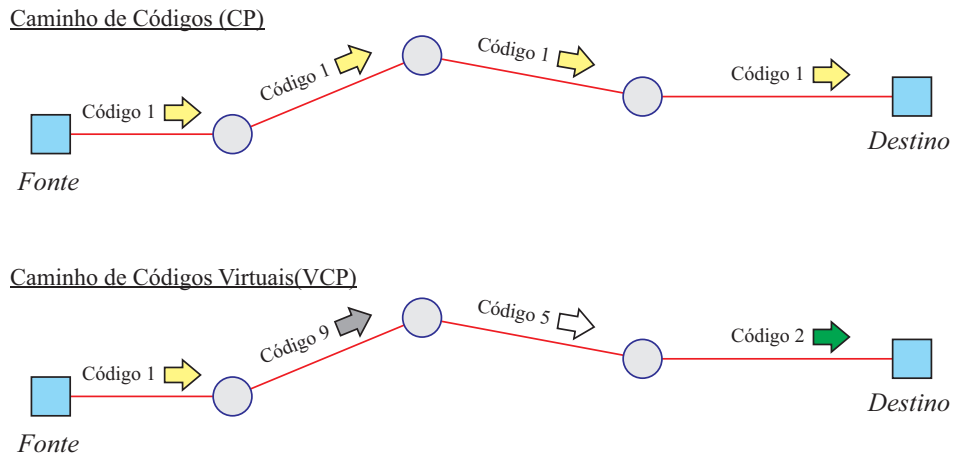


Figura 5: CP e VCP

O código de saída pode ser ajustado para o código de entrada, assim, o canal utiliza um e somente um código OCDM ao longo do caminho e a rede executa um caminho de código CP (*Code Patch*). No entanto, como este codificador é ajustável, o código de entrada pode ser convertido em qualquer outro código no mesmo conjunto, e um código de OCDM pode ser atribuído em um *link* por ligação de base. Neste caso, o canal usa diferentes códigos OCDM ao longo do caminho, e a rede realiza caminhos de códigos virtuais VCP (*Virtual Code Patch*) [23]. Uma ilustração esquemática do CP e do VCP é mostrado na Figura 5 para um sinal que vai da origem até o destino em três etapas.

Este roteador óptico totalmente transparente não necessita de fonte de luz ou conversão óptica-eletróptica (OEO), e pode ser redimensionado pela adição de módulos PCCR. O aumento na flexibilidade da rede pode ser conseguido pelo VCP, criando um maior número efetivo de códigos e potenciais usuários. Este roteador OCDM bi-dimensional foi demonstrado experimentalmente em [30].

### 2.3 ARQUITETURA MG-OXC-WDM

Em [9] e [25], foi proposto um *cross-connect* óptico multi-granular (MG-OXC) que é utilizado em diversas aplicações e requisitos de QoS em uma infra-estrutura comum de redes de transporte WDM. O MG-OXC-WDM é composto por duas tecnologias de comutação e foi

proposto com o objetivo de suportar diferentes requisitos de QoS, o que é muito comum em redes de transportes além de reduzir os custos de implementação da rede. Ele utiliza portas comutadoras MEMS para rotear o tráfego lento da rede (caracterizados por pacotes de longa duração), e interruptores SOA para direcionar o tráfego rápido (pacotes de curta duração). A concepção genérica deste MG-OXC encontra-se ilustrada na Figura 6.

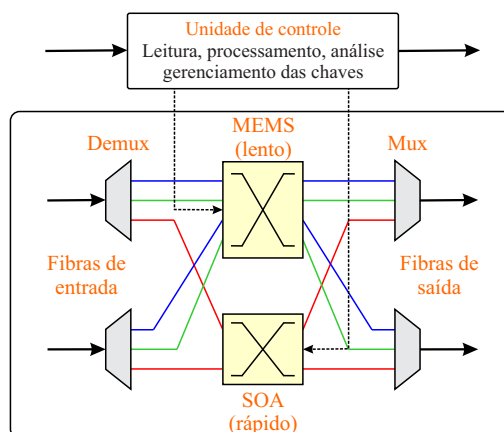


Figura 6: Chaveamento Multi-granular que suporta comutação de tráfego lento por meio de chaves MEMS e tráfego rápido por meio de chaves com tecnologia SOA.

Os resultados mostraram que mesmo uma quantidade mínima de comutadores rápidos podem atingir melhorias significativas no desempenho da rede. Assim, é possível suportar a latência de tráfego crítico com um interruptor de melhor custo-benefício do que se comparado a OXCs caros, e completamente compostos pela tecnologia SOA.

### 3 ARQUITETURA E DISPOSITIVOS DAS REDES ÓPTICAS

Este capítulo tem por objetivo servir de referencial teórico para o tema de pesquisa em questão. Ele irá apresentar a tecnologia WDM como camada de transporte, bem como os dispositivos ópticos empregados em suas redes, sua evolução e as principais características das redes em questão. Por outro lado, serão apresentadas as características da tecnologia OCDM e investigados os tipos de códigos ópticos, bem como suas características. Nesse contexto, será feita uma abordagem sobre as características e arquiteturas das redes ópticas com comutação híbrida, bem como será apresentada a arquitetura da rede proposta no trabalho. Por fim, será apresentado o consumo de potência dos dispositivos estudados, para que sirvam de referencial para o estudo de otimização que será feito adiante.

#### 3.1 A EVOLUÇÃO DO SISTEMA WDM

Ultimamente têm-se observado um grande crescimento na capacidade de transporte de dados nas fibras ópticas. A capacidade de transmissão advinda da largura de banda disponível, possibilitou o aumento do tráfego na rede bem como o crescimento da demanda e diversificação dos serviços de comunicação. Estes serviços podem ser caracterizados por três grandes frentes: a explosão da Internet e do conseqüente protocolo IP para interligação de máquinas, a proliferação das redes privadas virtuais VPN (*Virtual Private Network*) e mais recentemente o uso de aplicações como HDTV (*High-Definition Television*), vídeo-conferência e telefonia IP [11]. No entanto, a velocidade possível de processamento eletrônico em equipamentos comerciais é bastante limitada se comparada com a enorme banda provida pelos meios de comunicação ópticos. Essa grande diferença entre a velocidade de transmissão óptica e processamento eletrônico resulta em um gargalo na rede, comumente denominado gargalo eletrônico (*eletronic bottleneck*) [31].

Este gargalo é evidenciado por fatores tais como o congestionamentos na rede, pela carga de processamento nas unidades centrais de processamento e pelo descarte de informações de usuários ao longo do transporte na rede. Isso resulta em um tempo maior de ocupação do canal de comunicação, e em um pior compartilhamento dos recursos (que diminui o número de usuários simultâneos da rede) restringindo assim, a escalabilidade da rede [32]. Em virtude da característica de imprevisibilidade destes acontecimentos, ocorre também uma variação do atraso (*jitter*) das unidades de dados oriundas da mesma fonte que são direcionados para a mesma aplicação e destino. Todos estes acontecimentos restringem a provisão de serviços a

uma variedade de aplicações, principalmente as de missão críticas que são exigentes quanto aos aspectos de qualidade no serviço QoS.

Um outro fator que cabe ressaltar é que todas as facilidades providas pelo domínio óptico ainda não são totalmente exploradas nos sistemas de comunicação convencionais. Isto porque ainda não há implementações que permitem manipular dados, efetuar comutação e roteamento exclusivamente no domínio óptico; daí é inevitável a passagem para o domínio eletrônico em vários pontos da rota. Estas transições acabam por reduzir a vazão média de transmissão, uma vez que a capacidade de processamento eletrônica é inferior a taxa de transmissão suportada pelos sistemas ópticos [3].

### 3.1.1 Redes de primeira geração

As redes de comunicação possuem como características básicas de funcionamento, os aspectos de transmissão e roteamento. Estas funções eram inicialmente feitas de modo analógico e hoje em dia dão lugar a sistemas digitais. As redes ópticas de comunicações estão baseadas nas tecnologias de fibras ópticas e iniciaram seu crescimento na década de 70 quando desenvolveram-se fibras com perdas de 0,47 dB/km [11], e também com o surgimento do primeiro sistema de CATV (*Community Antenna Television*) em 1976 na Inglaterra [11, 33].

Os primeiros sistemas de transmissão ópticos utilizavam padrões altamente proprietários, sendo implementados inicialmente nas redes públicas de telefonia. As diferentes tecnologias adotadas pelos fornecedores dificultavam a interconexão de novos equipamentos e tornavam o custo de instalação e manutenção extremamente elevado, existindo a necessidade de criar um padrão para os equipamentos, interfaces e modos de transmissão. As redes ópticas síncronas SONET foi a solução adotada pelo Instituto Nacional de Padronização Americano ANSI como referência para as redes de comunicação ópticas. Para compatibilizar a transmissão mundial, começaram as primeiras pesquisas sobre a hierarquia digital síncrona SDH (*synchronous digital hierarchy*) na Europa, contando com o envolvimento da União Internacional de Telecomunicações (ITU-T). Em 1988 as três primeiras recomendações foram publicadas num encontro em Melbourne (Austrália) [34].

Quando a tecnologia óptica passou a ser empregada em redes de sistemas de comunicação, as fibras ópticas eram utilizadas apenas como meio de transmissão em substituição ao cabo de cobre, pois possuíam características de transmissão mais vantajosas em relação aos meios guiados metálicos. As redes ópticas de primeira geração são caracterizadas por esta mudança e pelo estabelecimento do padrão SONET/SDH [35].

Assim, este padrão é utilizado na maioria das redes de telecomunicações pois incorpora muitos benefícios como por exemplo, a multiplexação mais simples dos sinais, a facilidade de gerenciamento da rede, interconexão de equipamentos de diferentes fabricantes, entre outros.

As funções de amplificação, repetição comutação e roteamento das mensagens em redes SONET/SDH são feitas no domínio elétrico, utilizando circuitos eletrônicos. Estas redes utilizam apenas um único comprimento de onda para transmissão que em geral é de 1310 ou 1550 nm. Elas também são utilizadas para a conexão de computadores, que possuem taxas de *bits* mais modestas e podem ser introduzidos regeneradores opto-eletrônicos em caso da necessidade do aumento dos enlaces ópticos [3]. A regeneração destes sinais é conhecida como regeneração 3R (Realimentação, reformatação e retemporização), uma técnica que além de amplificar o nível de potência, retoma a forma e a posição relativa dos pulsos dentro do intervalo de tempo atribuído a eles [36].

O uso destes regeneradores, limita as redes de primeira geração em termos de desempenho e manutenção, pois cada dispositivo possui equipamentos eletrônicos com circuitos específicos para cada taxa de transmissão, o que dificulta a atuação dos *transponders* (subsistema na rede óptica que faz a conversão do sinal óptico de informação do cliente que estão no padrão SONET/SDH, IP, etc. ou outros, em um sinal em um sinal óptico que segue a grade da ITU - T) presentes no enlace de comunicação.

Outra limitação deste tipo de rede é a utilização de apenas um canal por fibra, tecnologia esta que nem de longe se aproveita da largura de banda disponível na fibra. A evidente necessidade de tráfego intenso de informações, fez evoluir as redes de primeira geração e passou a utilizar uma técnica que se utiliza de diversos canais em uma única fibra, fator responsável pelo desenvolvimento das redes de segunda geração.

### 3.1.2 Redes de segunda geração

Aliadas às baixíssimas perdas na transmissão e imunidade a interferência eletromagnética, as fibras ópticas possuem uma largura de banda extremamente alta (cerca de 25 Tbps na banda de 1550 nm). Entretanto, apenas taxas de transmissão da ordem de 10 Gbps são utilizadas uma vez que os dispositivos comerciais utilizados para modular os sinais eletronicamente estão limitados a esta taxa (gargalo).

O método mais eficiente de se aproveitar dessa largura de banda e minimizar o gargalo é a tecnologia WDM. Esta técnica que consiste basicamente em transmitir, por meio de uma fibra, vários feixes de luz com comprimentos de onda diferentes simultaneamente. O

principal atrativo desta tecnologia, é o fato de se obter um incremento significativo da largura de banda disponível reduzindo custos, pois dispensa a instalação de fibras ópticas adicionais. Por exemplo, para transmitir 40 Gbps sobre 600 km utilizando um sistema tradicional, requerem-se 16 pares de fibra óptica, cada um operando a 2.5 Gb/s, e 224 regeneradores, dado que estes são instalados a cada 40 km. Por outro lado, um sistema WDM de 16 canais requer só um par de fibra óptica, e 4 amplificadores ópticos, dado que os amplificadores são instalados a cada 120 km. Sistemas WDM que usam 32 comprimentos de onda a OC-192 para proporcionar taxas de até 320 Gbps, encontram-se disponíveis no mercado [37].

Outra tecnologia muito importante para promover o aumento da banda de passagem da fibra óptica, é o amplificador a fibra dopada com Érbio EDFA (*Erbium doped fiber amplifier*), o qual tornou-se o elemento de amplificação mais utilizado atualmente nas redes atuais para transmissão a longa distância e com intenso tráfego de dados. Sua principal característica de operação é a capacidade de amplificação simultânea de vários canais ópticos. O EDFA é constituído por um pedaço de fibra de comprimento  $L$ , cujo núcleo é uniformemente dopado com íons de érbio  $Er^{3+}$ . Esses íons podem ser considerados como sistemas simples de dois níveis, ou seja, eles podem ter apenas dois estados de energia: um estado fundamental e um estado excitado.

A amplificação óptica ocorre por meio de um processo denominado emissão estimulada. Para que ela ocorra, uma forte radiação eletromagnética de elevada energia e comprimento de onda adequado (geralmente de 980 nm ou 1480 nm) é propagado no núcleo da fibra, a fim de excitar os seus íons. Os íons excitados pelos fótons do sinal de entrada têm uma certa probabilidade (dependendo do comprimento de onda dos fótons incidentes) de liberar por emissão estimulada de um fóton idêntico ao incidente. A liberação da energia estimulada, leva o íon excitado ao seu estado fundamental. Portanto, a partir de um fóton incidente, pode-se obter, por um processo de avalanche ao longo do núcleo da fibra, produzindo uma média de  $G$  fótons na saída da fibra, ou seja, o sinal foi amplificado por um fator  $G$ , conhecidos como o Ganho, posto que a probabilidade de emissão estimulada depende do comprimento de onda incidente, assim como do ganho. Em sistemas WDM, os feixes de laser em diferentes comprimentos de onda (trazendo informações moduladas de cada usuário) são acoplados nos EDFA e propagados na fibra, juntamente com a radiação eletromagnética responsável pela excitação (*pump*). Enquanto esta “perde” fótons para excitar os íons que se propagam, os sinais estimulados pela emissão “ganham” fótons. O espectro de absorção do érbio possui diversas faixas espectrais que podem ser utilizadas para o bombeio dos amplificadores. No entanto, por razões referentes ao mercado de lasers semicondutores, apenas as duas faixas espectrais citadas são utilizadas [38].

As redes ópticas que não possuem a capacidade de rotear canais ópticos, baseadas

em WDM, são classificadas como redes ópticas de segunda geração [39]. Este tipo de rede explora a ampla largura da banda óptica e nela o receptor do usuário final deve operar em uma taxa eletrônica fixa. Apresenta-se como uma boa alternativa ao demasiado crescimento de utilização de banda pois possibilita multiplexar vários canais WDM de diferentes usuários finais em uma única fibra. Após o desenvolvimento dos EDFAs, o início da década de 90 vivenciou a primeira geração de sistemas WDM comerciais. Estes sistemas comportavam de 2 a 4 canais ópticos com espaçamento de 3 a 5 nm. Já no final desta década, surgiam sistemas WDM comerciais de 8, 16 e 40 canais, entre outros [11]. Sistemas WDM com um número de canais superior a 16 recebem a denominação WDM denso - DWDM. Em de 2002, os sistemas já compostos por 64 canais operando nos comprimentos de onda da banda C (1535 - 1565 nm) com comprimento de onda central de 1550 nm [40]. Nestes sistemas os canais estão igualmente separados em 100 GHz. Esta faixa de comprimentos de onda caracteriza-se por concentrar a faixa de ganho dos amplificadores ópticos EDFA e a faixa de comprimentos de onda de menor atenuação da sílica [11].

A Figura 7 ilustra um enlace de segunda geração ponto-a-ponto. De modo similar a qualquer sistema de comunicação, um sistema óptico WDM é constituído de um transmissor, receptor e canal, sendo considerado o canal o meio físico que os liga.

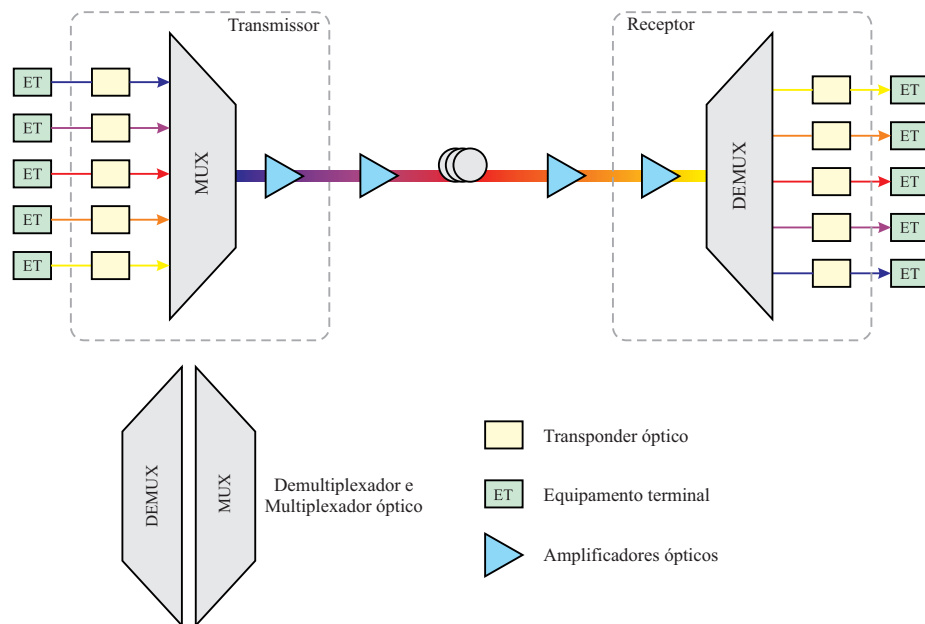


Figura 7: Sistema de comunicação WDM ponto a ponto de cinco canais.

No sistema WDM diversos sinais oriundos de vários transmissores são agrupados na fibra por meio de um multiplexador (MUX). A função do transmissor é converter um sinal elétrico de mensagem gerado no equipamento terminal (ET), em um sinal óptico utilizando um conversor (transponder óptico). A medida que os sinais transmitidos propagam-se nos canais,

o pulso e o espectro óptico sofrem modificações devido a imperfeições na camada física e nos subsistemas ópticos que compõem o enlace. Estas modificações no sinal original serão tratadas de forma mais detalhada nas próximas seções.

O receptor atua no sinal recebido afim de reconstruí-lo. No receptor, os sinais provenientes de cada transmissor são separados pelo demultiplexador (DEMUX), processados no conversor ópto-elétrico e enviados ao equipamento terminal. Os comprimentos de onda são transmitidos para todos os nós e a detecção do sinal em qualquer um deles deve empregar um dispositivo que retira um comprimento de onda ao mesmo tempo em que rejeita os canais vizinhos. Este processo é executado por meio de filtros ópticos de alta seletividade denominados multiplexadores de adição e retirada de comprimento de onda OADM. Estes dispositivos permitem que comprimentos de onda sejam adicionados ou retirados em pontos ao longo de um enlace. Os primeiros dispositivos OADM eram estáticos, ou seja, retiravam apenas comprimentos de onda pré-determinados, o que por sua vez representava um problema de mobilidade e logística pois se precisava possuir muitas unidades destes dispositivos em estoque, para fins de troca e reposição. A Figura 8 simboliza um OADM com estas características.

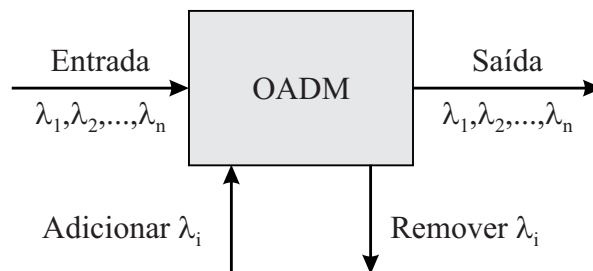


Figura 8: Representação de um OADM unidirecional

Com o advento dos diodos LASERs sintonizáveis, este problema foi em parte resolvido. Eram necessárias ter-se poucas unidades e, no caso de necessidade, elas poderiam ser sintonizadas em campo para o comprimento de onda desejado. A evolução dos sistemas ópticos fez o desenvolvimento de OADM's remotos, que poderiam ter os comprimentos de onda de inserção e retirada, configurados de forma dinâmica.

Dentre as diversas topologias físicas disponíveis para as redes ópticas, as mais adequadas para executar essas funções são o barramento e a estrela. Porém, devido à adoção do SDH, a segunda geração de redes é baseada na topologia em anel [39] que pode ser distinta em topologia física e topologia virtual. A primeira refere-se à presença de componentes tais como fibras ópticas e acopladores interligando os nós da rede. A segunda pode ser representada por um grafo que descreve a trajetória da informação por todos os nós intermediários entre o nó origem e o nó destino, para cada par origem-destino [41]. Na Figura 9 podem ser visualizadas a topologia física e a correspondente topologia virtual para uma rede óptica de segunda geração.

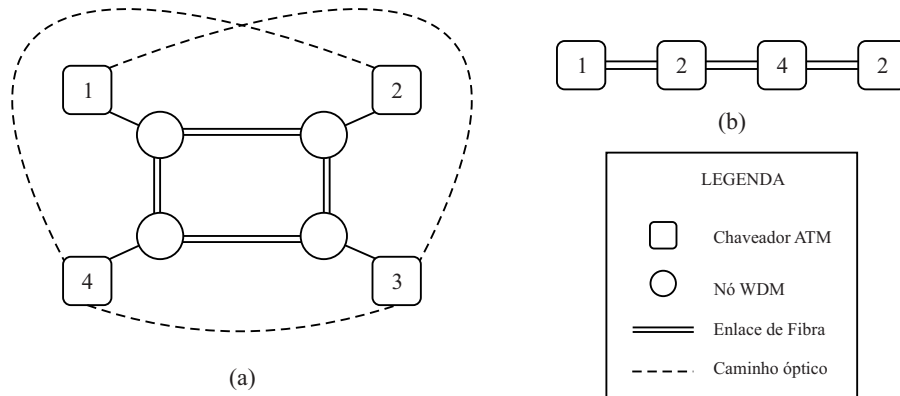


Figura 9: (a) Topologia física da rede, com os caminhos ópticos estabelecidos mostrados. (b) Topologia virtual, aquela vista pela camada cliente da camada fotônica.

Como descrito na figura, a topologia virtual pode ser entendida como a camada da cliente vista da fotônica. A configuração física em anel, para este arranjo de caminhos ópticos é vista como uma topologia unifilar que pode ser uma rede IP, ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), etc. A topologia ATM surgiu nos anos 90 como uma solução de engenharia capaz de integrar as redes de dados com as redes de voz.

Basicamente, as características definem as redes ópticas de segunda geração são:

- Disseminação (“*broadcast*”) da luz por todos os nós da rede mediante o uso de topologias físicas que facilitem tal tarefa;
- Seleção do canal desejado na recepção por intermédio de filtragem óptica;
- Pode-se ainda utilizar transmissores e/ou receptores sintonizáveis, o que acarreta na possibilidade de rearranjo da topologia de caminhos físicos. Se esta sintonia for suficientemente rápida, torna-se possível a comutação pacote por pacote.

### 3.1.3 Redes de terceira geração

O aumento de tráfego em função de recursos de multimídia e comunicação de dados dos últimos anos, novamente fez com que as redes passassem por processos evolutivos, visando aumento de capacidade de transmissão. Observou-se que a transmissão ponto-a-ponto em anel não era mais suficiente, pois ocorriam muitas perdas e inviabilizava os serviços da camada de aplicação do cliente final. A solução encontrada, foi utilizar a topologia de rede WDM do tipo malha, pois esta poderia fazer o desvio de caminho de alguns comprimentos de onda no nó, procurando seguir a melhor rota baseada em fatores como distância, qualidade, custo e confiabilidade de rotas específicas.

As redes de terceira geração são classificadas como redes que podem fazer o roteamento de canais ópticos, e também são conhecidas como redes ópticas reconfiguráveis. Diversas linhas de pesquisa em vários laboratórios viabilizaram a utilização do espectro óptico em fibras de sílica padrão de redes ponto-a-ponto também nestas redes [42]. As redes baseadas em roteamento de canais são consideradas como uma evolução das redes ponto-a-ponto, e devem prover caminhos ópticos para atender a solicitação entre pares de nós, cada qual utilizando diferentes comprimentos de onda dentro do enlace. Para que isto seja possível, foi necessária a colocação de dispositivos ópticos de adição e retirada de comprimentos de onda que fossem controlados remotamente. Um destes dispositivos é o multiplexador de adição e retirada de comprimento de onda reconfigurável ROADM ilustrado na Figura 10. Este dispositivo consiste de um DEMUX, um conjunto de chaves  $2 \times 2$  e um MUX. Inserido em um enlace óptico, torna possível o roteamento por comprimento de onda do sistema [36].

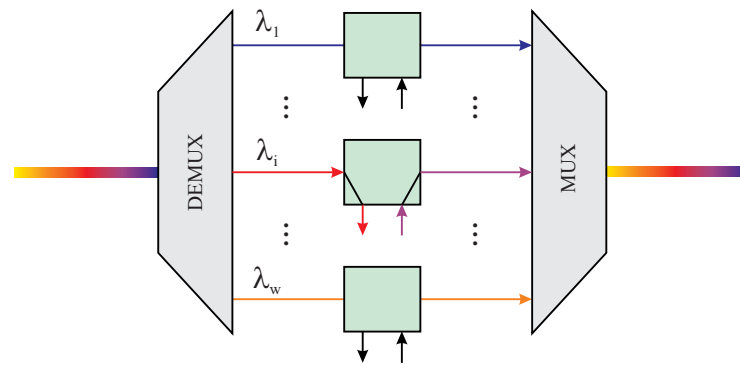


Figura 10: Multiplexador de adição e retirada de comprimento de onda reconfigurável.

Se todas as chaves  $2 \times 2$  encontram-se no modo passagem, todos os canais seguem por meio do ROADM sem modificação. Entretanto, caso uma chave  $2 \times 2$  esteja configurada no modo de inserção (como o canal  $\lambda_i$  da Figura 10) por meio de controle eletrônico (não ilustrado na Figura 10), o sinal no comprimento de onda específico é removido localmente e o novo quadro de dados pode ser inserido no mesmo  $\lambda_i$  neste ROADM. Mais de um comprimento de onda pode ser inserido ou retirado se a interface do ROADM prover a eletrônica e processamento necessários [36].

Após a evolução dos OADMs, a busca por uma maior flexibilidade das redes ópticas levou ao desenvolvimento de dispositivos OXC. Este dispositivo, assim como o ROADM permite a reconfiguração óptica de forma eletrônica e sob demanda. Sua função básica é conectar qualquer comprimento de onda que chega em uma das portas de entrada com outra interface de saída do dispositivo. Este dispositivo entretanto, não possui entrada e saída adicionais para a adição e remoção de canais locais. Existem muitas tecnologias de fabricação de OXC's, porém a que tem representado melhores resultados é conhecida por MEMS. Esta tecnologia consiste

na fabricação de espelhos microscópicos que são utilizados para desviar o sinal óptico para a direção desejada [43]. Estes espelhos são rotacionados por meio da aplicação de um sinal elétrico. Isso possibilita uma maior utilização da largura de banda por meio da possibilidade de alocar os comprimentos de onda que se encontram em trânsito no nó em comprimentos de onda específicos que não passarão nem pela conversão nem pelo processamento eletrônico, o que permite que a quantidade de tráfego que é processada eletronicamente pelo nó seja melhor gerenciada, sendo processado apenas o tráfego correspondente aos comprimentos de onda que têm como endereço final o respectivo nó [44].

O fato dos canais em trânsito não serem convertidos para o domínio elétrico é obtido pela introdução do roteamento no domínio óptico (comprimento de onda) realizado pelos OXC's. A Figura 11 ilustra um OXC que possui configuração com múltiplas portas e fibras de entrada e saída conectadas entre si, que são capazes de redirecionar os comprimentos de onda de qualquer porta de entrada, para qualquer porta de saída de acordo com a configuração da rede. Além disso, cada OXC pode estar conectado a um ou mais comutadores eletrônicos (*electronic switches*).

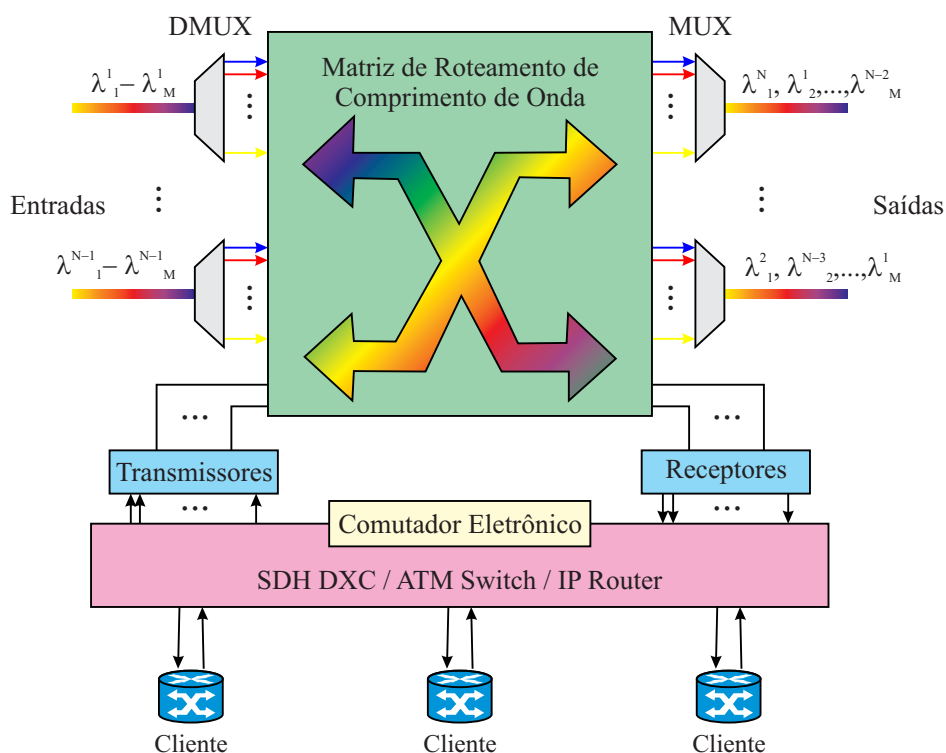


Figura 11: Nó de uma rede com chaveamento combinando um *Cross-Connect* Óptico e uma chave eletrônica

As redes de terceira geração possuem um elevado grau de reconfiguração devido à possibilidade de inserção e remoção de canais ópticos em diferentes pontos da rede e ao roteamento dos pacotes de acordo com o comprimento de onda. Para isto necessita o aprovisiona-



sinais.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DAS REDES WDM

De acordo com os aspectos citados nas três gerações de redes acima, é cabível que suas características principais sejam formalizadas. Uma rede WDM com roteamento por comprimento de onda basicamente possui os seguintes aspectos [37]:

- Reutilização de comprimento de onda: Em uma rede WDM reconfigurável, os comprimentos de onda são limitados, mas podem ser reutilizados desde que dois caminhos ópticos não utilizem o mesmo comprimento de onda dentro do mesmo enlace. Esta possibilidade de reutilização, aumenta a capacidade da rede pois permite que ela tenha um grande número de caminhos utilizando um número limitado de comprimentos de onda, o que contribui para que estas redes sejam escaláveis.
- Chaveamento: Os caminhos proporcionados pela camada óptica podem ser desativados ou mesmo ativados de acordo com as necessidades da rede, processo semelhante ao que ocorre em em uma rede por comutação de circuitos, exceto pelo fato de que na rede óptica esse processo tende a ser bem mais rápido devida a grande diferença de largura de banda alocada.
- Confiabilidade: A rede pode, em caso de falha de algum enlace, arranjar os caminhos ópticos existentes por rotas alternativas evitando que a comunicação seja cessada. Pra isso é obrigatório que o tempo de reconfiguração seja muito pequeno, em geral da ordem de milisegundos. A maioria dos componentes utilizados, tais como MUX e DEMUX são passivos o que torna a confiabilidade da rede aumentada.
- Transparência: refere-se a capacidade dos caminhos ópticos de transportar dados em uma variedade de taxas, protocolos e formatos suportando várias camadas superiores operando ao mesmo tempo. Assim, as redes podem transportar simultaneamente o tráfego SONET/SDH, ATM e outros padrões como *ethernet*, por exemplo [46]. Em uma rede óptica transparente, o sinal óptico é transmitido ao longo de nós intermediários sem a realização de conversão para o domínio eletrônico. Desta forma, o custo associado a uma comutação de alta velocidade em meio eletrônico é eliminado [3]

O aumento do tráfego gerado pela Internet tornou o protocolo IP dominante nas redes de dados e também o consolidou como elemento de convergência com as telecomunicações. Desta forma, se a tendência de crescimento do tráfego deste protocolo for mantida, o seu

transporte constituirá o principal tipo de serviço das redes ópticas [11]. Portanto, é natural que seja concebidas arquiteturas de rede que otimizem o seu transporte [47].

O tráfego de IP em redes WDM vem sendo realizado por meio de pilhas de protocolos como IP sobre ATM sobre SONET/SDH sobre WDM, ou IP sobre SONET/SDH sobre WDM. Porém a crescente demanda de tráfego tem requerido cada vez mais taxas de transmissão maiores e isto é observado pelo maior emprego de interfaces OC-48 (2,488 Gbps) e ainda, pelo fato de serem requeridas velocidades maiores [11], [40]. A Figura 13 ilustra as alternativas de arquiteturas de transporte de IP sobre WDM que já foram exploradas e a mais recente proposta de integração IP sobre WDM utilizando o GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*) [11], [48].

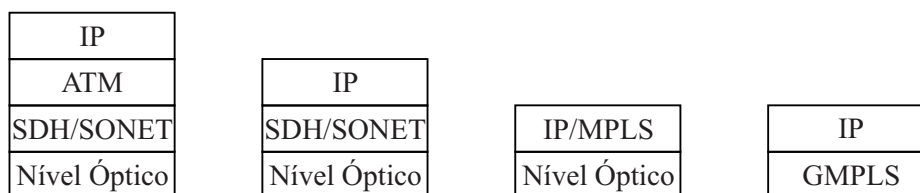


Figura 13: Alternativas de arquiteturas de redes IP sobre WDM.

A atuação nos ROADMs, OXCs e demais dispositivos deve ser realizada de forma automática, tornando o processo de habilitação de circuitos em redes ópticas reconfiguráveis ações rápidas e eficientes. Com o intuito de automatizar este processo, utilizam-se algoritmos de trabalho no plano de controle da rede, como por exemplo, o GMPLS. Este protocolo trata-se de um esquema que rotula o pacote de informações a serem transmitidas e a partir destes rótulos, comuta a informação até seu destino. No caso da tecnologia WDM atual, o rótulo pelo qual o sinal transmitido será roteado e encaminhado é o próprio comprimento de onda que transporta o sinal. A principal característica do GMPLS é a separação entre o plano de controle e o plano de dados. O plano de dados é por onde a informação de fato vai passar, ou seja, todos esses diferentes tipos de comutadores e roteadores. Esse plano pode ser híbrido, logo temos essas diferentes tecnologias se comunicando. O plano de dados está dividido em camadas, cada camada representa um tipo de comutação, por exemplo: ethernet, ATM, fibra ótica. A informação deve ser capaz de transitar verticalmente, entre camadas, e horizontalmente, dentro de uma mesma camada [11], [48].

A separação da informação de encaminhamento do conteúdo do cabeçalho IP permite à tecnologia GMPLS utilizar dispositivos como OXCs para roteamento do sinal óptico sem a necessidade de conversões e processamento eletrônico da informação. Desta forma, evita-se o gargalo eletrônico do sinal [11].

### 3.3 ALTERNATIVAS DE COMUTAÇÃO

O crescimento do número de comprimentos de onda e das taxas de transmissão, constitui um desafio tecnológico. Ainda existem redes cujos nós são totalmente baseados em comutadores eletrônicos, onde a informação é passada para o domínio elétrico, processada e depois distribuída, o que limita bastante a capacidade de transmissão da rede. Uma excelente solução seria minimizar o processamento eletrônico intermediário [49]. O constante aprimoramento visando melhorar a eficácia do sistema possibilitou novas alternativas de comutação para redes ópticas transparentes. Em relação a comutação, as redes ópticas podem ser [3]: por comutação de circuitos ópticos, por comutação de pacotes ópticos ou ainda por comutação de rajadas ópticas.

As redes ópticas por comutação de circuitos ópticos OCS empregam a tecnologia de comutação de *lightpaths* que formam a camada óptica. As mensagens são transmitidas após o estabelecimento destes *lightpaths* por meio da configuração dos OXCs ao longo da rede. A duração da conexão é longa e a utilização da largura de banda é baixa, pois não é empregada multiplexação estatística [50]. Apesar da ineficiência em comunicações de curta duração, a comutação OCS permite a reserva de recursos com garantia de QoS para comunicações no circuito ótico [3].

A tecnologia óptica atual ainda não processa o sinal a ser transmitido de forma totalmente eficiente, de modo que geralmente este é dividido em duas partes: cabeçalho e informação transmitida *payload*. Assim, quando chega em um nó, o cabeçalho é processado no domínio eletrônico enquanto o *payload* é atrasado em fibras ópticas de retardo FDL (*Fiber Delay Lines*) e depois comutado para o destino determinado pelo cabeçalho [11].

As redes ópticas por comutação de pacotes ópticos OPS empregam um cabeçalho para cada pacote e ambos são transmitidos no mesmo comprimento de onda. Neste tipo de tecnologia não existe a reserva de recursos e a qualidade de serviço é difícil de se garantir.

O terceiro tipo de comutação é feito por rajadas ópticas OBS. Uma rajada óptica é uma espécie de *container* que agrupa pacotes de dados a serem encaminhados para o mesmo destino, e possui apenas um cabeçalho o qual geralmente é enviado antes da rajada a fim de se fazer a reserva de recursos [49]. Na comutação OBS, a rajada óptica é em geral enviada sem que a reserva de recursos seja confirmada, o que não garante o sucesso em seu roteamento. Esta comutação acaba sendo uma boa alternativa para o envio de pequenos volumes de tráfego quando os requisitos de QoS são baixos.

### 3.4 DISPOSITIVOS DAS REDES ÓPTICAS

Para que o sinal transmitido seja corretamente entregue ao seu destino, um série de dispositivos e tecnologias devem atuar na transmissão, manutenção e distribuição do sinal ao longo da rede. Estes dispositivos foram brevemente citados nos tópicos acima e serão abordados de forma mais detalhada neste item.

#### 3.4.1 *Optical Line Terminal* - OLT

A Figura 14 ilustra um OLT (*Optical Line Terminal*). Estes dispositivos são utilizados nas extremidades de *links* em conexões ponto-a-ponto, multiplexando e demultiplexando os comprimentos de onda utilizados na rede [51]. Elementos como *transponders*, multiplexadores - Mux e demultiplexadores - Demux estão presentes no OLT. Já os amplificadores ópticos do tipo *boost* podem ou não estar presentes nestes. O termo *transponder*, é uma abreviação de *transmitter/responder* (transmissor-receptor).

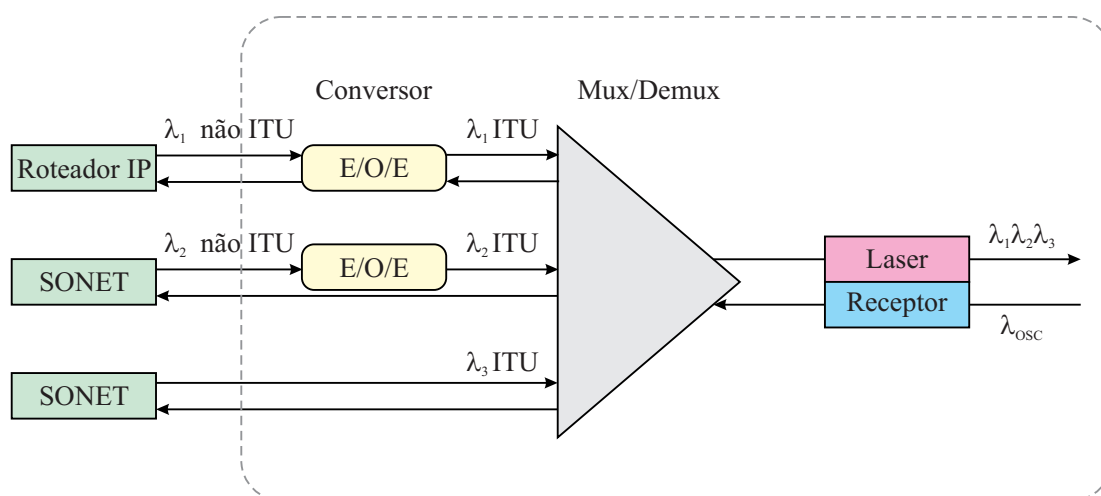


Figura 14: Representação de um OLT contendo transponder, Mux e Demux.

Na outra extremidade do sistema outro *transponder* é necessário para fazer a conversão do comprimento de onda na banda S, C, ou L para o comprimento de onda específico do sinal cliente ou são inseridos diretamente no equipamento do usuário. O *transponder* também possui um canal óptico de supervisão OSC (*Optic Supervision Channel*). O OSC é transportado em um comprimento de onda diferente dos comprimentos de onda que levam o tráfego do usuário. Ele é usado para monitorar o desempenho dos amplificadores ao longo do enlace, assim como outras funções de gerenciamento [3].

Os *transponders* podem ser classificados em [51]:

- Fixos: os quais enviam e recebem sinais ópticos em um comprimento de onda específico;
- Sintonizáveis: emitem e recebem sinal óptico em qualquer comprimento de onda presente na rede.

A função do multiplexador como já discutida, é inserir vários comprimentos de onda dentro da fibra. Os amplificadores podem estar presentes em um OLT com o objetivo de amplificar o sinal que geralmente sofre distorções devido a imperfeições na fibra.

### 3.4.2 Amplificadores ópticos

Um dos efeitos degradantes na transmissão óptica de dados, é a atenuação, que provoca limitação em termos de distância das redes ópticas necessitando que os sinais sejam amplificados. Inicialmente, a amplificação dos sinais era feita por repetidores optoeletrônicos, processo que realizava a conversão dos sinais para o domínio elétrico e, novamente para o domínio óptico. Por outro lado, os sistemas WDM requerem um repetidor dedicado para cada canal, o que os torna proibitivos em termos de custos, transparência, manutenção e confiabilidade dos sistemas [52]. Se a amplificação for realizada no domínio óptico sem a conversão para o domínio elétrico, muitas vantagens podem ser observadas em relação aos regeneradores. Este tipo de amplificação apresenta um menor consumo de energia, menor complexidade e maior flexibilidade.

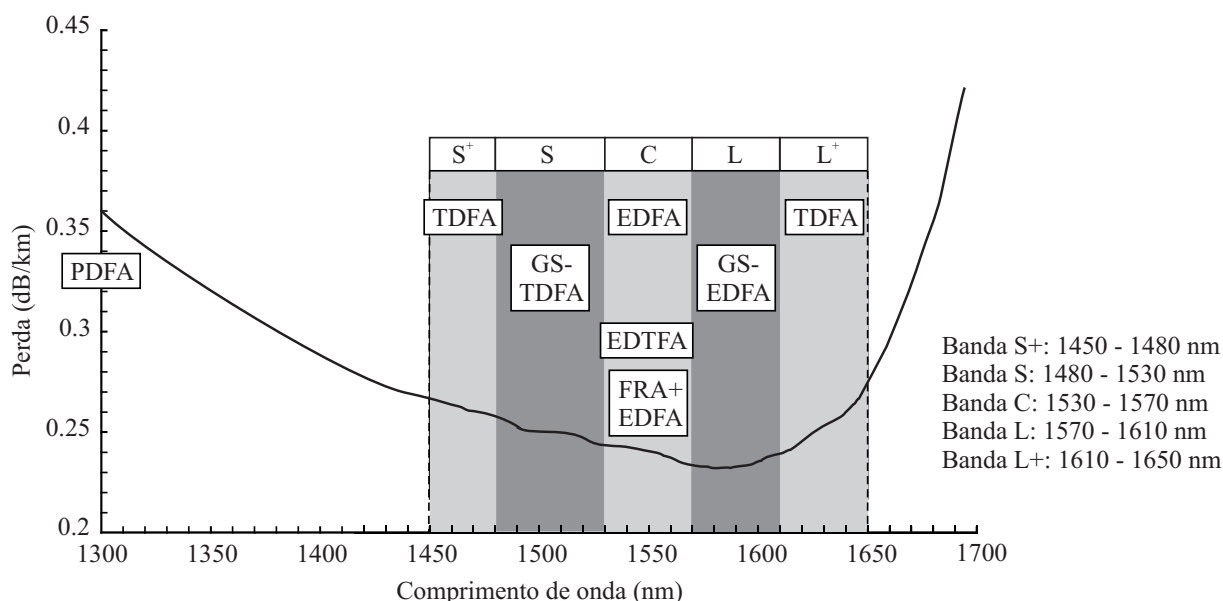
- EDFA

Os amplificadores a fibra dopados com terras raras, constituíram o principal determinante para as redes ópticas de segunda geração. O EDFA é o amplificador mais utilizado no cenário atual das redes ópticas, por apresentar baixo custo e versatilidade de produção, além de amplificar os sinais ópticos em banda C.

Outros amplificadores utilizados para a amplificação de sinais fora da banda C foram desenvolvidos, baseados no mesmo princípio de funcionamento. A Figura 15 ilustra alguns deles e sua banda de atuação.

Pode-se observar que é possível utilizar os EDFA fora da banda C. Fazendo alterações no projeto é possível utilizá-lo por exemplo na banda L como ilustrado na Figura 15. Embora não utilize o mesmo princípio das fibras dopadas, a amplificação Raman é utilizada ao longo da banda C. A amplificação híbrida (Raman + EDFA) é também utilizada para garantir melhor desempenho, promovendo amplificação na mesma banda de operação que o EDFA, entretanto, com uma baixa emissão de ruído, garantindo maiores enlaces sem a regeneração do

signal [36].



PDFA - Amplificador a fibra dopada com Praseodímio  
 TDFA - Amplificador a fibra dopada com Túlio  
 GS - TDFA - TDFA de ganho deslocado  
 GS - EDFA - EDFA de ganho deslocado  
 EDTFA - EDFA em matriz de Telúrito  
 FRA+EDFA - Amplificador RAMAN e EDFA

Figura 15: Fibra com redução da influência do  $OH^-$  e a faixa espectral dos amplificadores ópticos utilizado em diversas faixas do espectro óptico de baixa perda.

- SOA

O amplificador óptico semicondutor SOA, constitui uma outra alternativa de amplificação. Em sua arquitetura mais básica, este é feito a partir de uma junção  $p-n$  de materiais semicondutores, de maneira similar a um diodo laser. Historicamente, os SOAs surgiram dos lasers semicondutores, já que estes funcionam como amplificadores antes de chegar ao limiar de operação; portanto, os primeiros amplificadores foram justamente lasers polarizados logo abaixo do limiar [53].

Um amplificador SOA, semelhante ao EDFA consegue realizar a amplificação de sinais por meio de níveis de energia [54]. Em um material semicondutor também ocorrem os processos de absorção, emissão espontânea e emissão estimulada, este último efetivamente responsável pela amplificação. Esta transição, ocorre entre as bandas de condução e de valência nos semicondutores. A diferença de energia entre estas duas bandas, é denominada energia de *bandgap*. A descrição dos processos se segue [55]:

1. Absorção: Um fóton incidente na região ativa poderá ser absorvido por um elétron da banda de valência, e este passará para a banda de condução. Isto ocorre somente se o fóton incidente possuir energia igual ou superior à energia do *bandgap*.

2. Emissão espontânea: A banda de condução é um estado excitado, i.e., um elétron nesta banda não está em equilíbrio [56]. Há, portanto, uma probabilidade não-nula de que um elétron deste nível se recombine com uma lacuna da banda de valência, dando origem a um fóton de direção e fase aleatórias. Este processo é a origem do ruído em amplificadores ópticos, e não pode ser evitado, sendo intrínseco ao dispositivo [53].
3. Emissão estimulada: Quando um fóton incidente possui energia que esteja entre os níveis de quase-Fermi das bandas de condução e de valência, e havendo elétrons disponíveis na banda de condução, pode ocorrer que este fóton interaja com um elétron, causando a recombinação radiativa deste com uma lacuna da banda de valência. Desta recombinação há a criação de um novo fóton que é uma exata réplica do incidente, tendo as mesmas características deste: comprimento de onda (portanto energia), fase e polarização.

A emissão estimulada em SOAs é obtida por meio de uma corrente de polarização. Ao se polarizar uma junção diretamente, ocorre uma difusão de portadores por ela. Esta difusão coloca elétrons e lacunas frente a frente pois diminui a barreira de potencial. Se esta corrente de polarização for pequena, o SOA comporta-se como um detector [57], pois absorve todos os fótons incidentes (do sinal a ser amplificado) e os transforma em sinais elétricos. Porém, se esta corrente possuir um valor suficientemente alto, o fenômeno da emissão estimulada cresce, e se este for dominante em relação aos efeitos de absorção juntamente com emissão espontânea, ocorre uma condição chamada de “inversão de população” [53] o que significa que existe uma maior concentração de portadores na camada de condução, em relação a camada de valência.

### 3.4.3 OADM e ROADM

Os nós ópticos com funções de OADM são peças essenciais no processo de evolução das topologias das redes ópticas transparentes. A função principal destes nós é permitir o acesso local (extração e inserção) dos canais ópticos agregados no sinal propagante [58]. Os OADM convencionais consistem em MUXs e DEMUXs ópticos, interligados por meio de padrões pré-definidos, de forma a realizar as operações de extração e inserção de canais numa forma fixa [53].

A Figura 16 ilustra um modelo funcional. Na figura, os  $M$  demultiplexadores são utilizados para separar os  $W$  comprimentos de onda do sinal WDM em cada uma das  $M$  entradas, enquanto os multiplexadores reúnem os comprimentos de onda escolhidos em cada uma das  $N$  saídas. A matriz de comutação irá relacionar os comprimentos de onda de entrada e saída. No caso do OADM, esta matriz é estática e, além das  $N$  entradas e saídas, há também

entradas e saídas para a adição e remoção de canais fixos localmente.

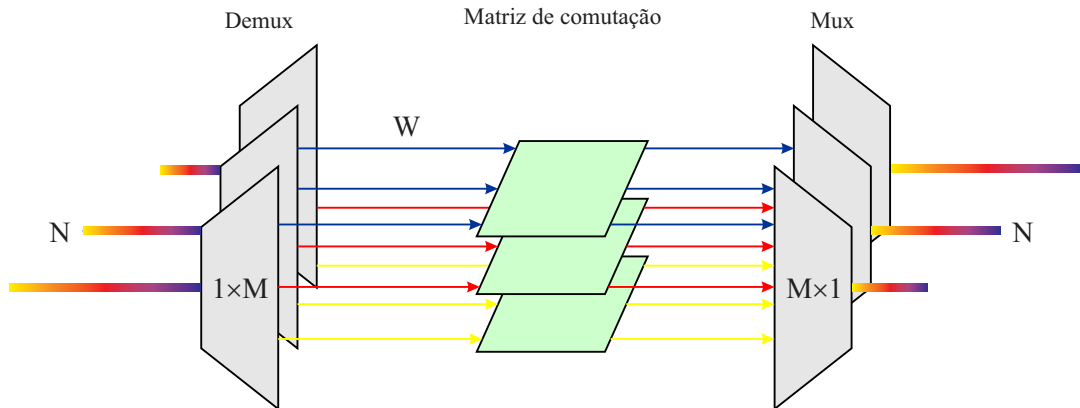


Figura 16: Modelo funcional para OADM, ROADM e OXC  $N \times N$ .

No caso do ROADM, esta matriz pode ser reconfigurada de forma local ou remota, dependendo da tecnologia utilizada. Esta propriedade permite que a rede óptica seja reconfigurável de acordo com a necessidade da controladora da rede, cujo estímulo é provocado por clientes [53] e também possibilita a adição e remoção de canais.

Quando utilizado com a finalidade de adição ou remoção de canais, o ROADM emprega uma tecnologia de comutação denominada PLC (*Planar Lightwave Circuit*). A Figura 17 ilustra seu princípio de funcionamento.

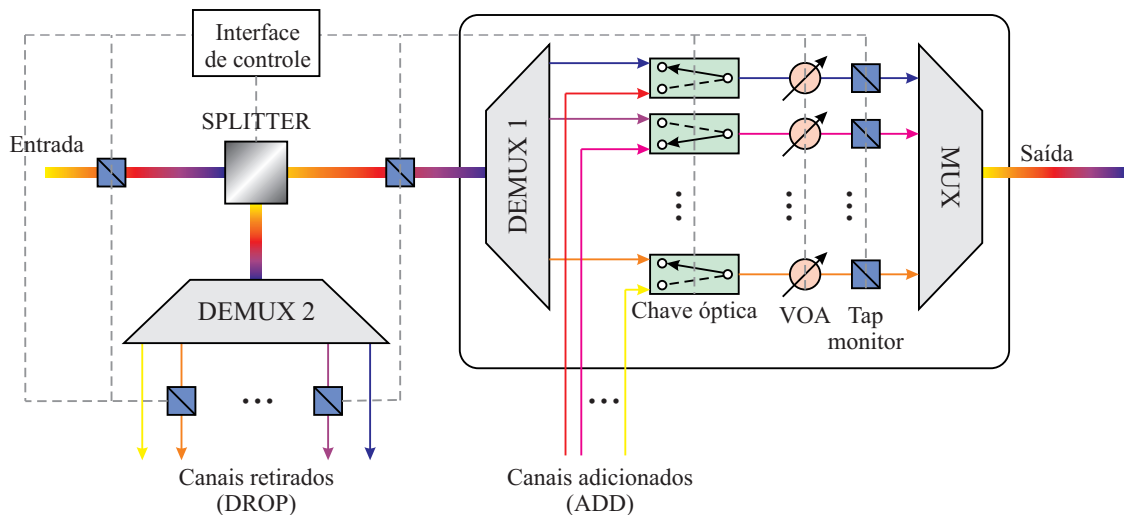


Figura 17: Arquitetura de um ROADM baseado em PLC

Parte do sinal de entrada é desviada para o DEMUX 2 que é responsável pela retirada de canais. A outra parte do sinal incidente segue para o módulo adicionador reconfigurável. Neste módulo, a parte do sinal de entrada que não foi retirada é demultiplexada. O módulo conta ainda com as entradas para a inserção de canais. Em geral são adicionados várias entradas visando proporcionar maiores graus de liberdade para a manipulação de clientes. As chaves ópti-

cas são responsáveis por selecionar qual sinal seguirá para o multiplexador e conseqüentemente para a saída do sistema. Os atenuadores ópticos variáveis VOA (*Variable Optical Attenuator*), tem a finalidade de fazer ajustes de potência do sinal, uma vez que em redes DWDM é muito importante que se mantenha níveis de energia iguais entre os diferentes canais ópticos, uma vez que níveis irregulares de potência óptica apresentará uma série de dificuldades devido ao efeito de *crosstalk* e outras questões não lineares [59]. Os canais de adição/remoção PLC ROADM são de luzes coloridas, isto é, somente comprimentos de onda de cor pré-definida podem ser adicionados/removidos em cada porta, e poderá operar em cooperação com filtro ajustável e laser ajustável.

Devido à integração, o PLC tornou-se uma das soluções ROADM de baixo custo.

- Vantagens: o Multiplexador/demultiplexador possui tecnologia madura e confiável, pequena perda de inserção em um nó, baixo custo em adição/remoção de diversos comprimentos de onda, e fácil atualização para OXC.
- Desvantagens: a estrutura modular é fraca, o custo de configuração inicial é alto e a confiabilidade de matriz cruzada de grande capacidade deverá ser otimizada.

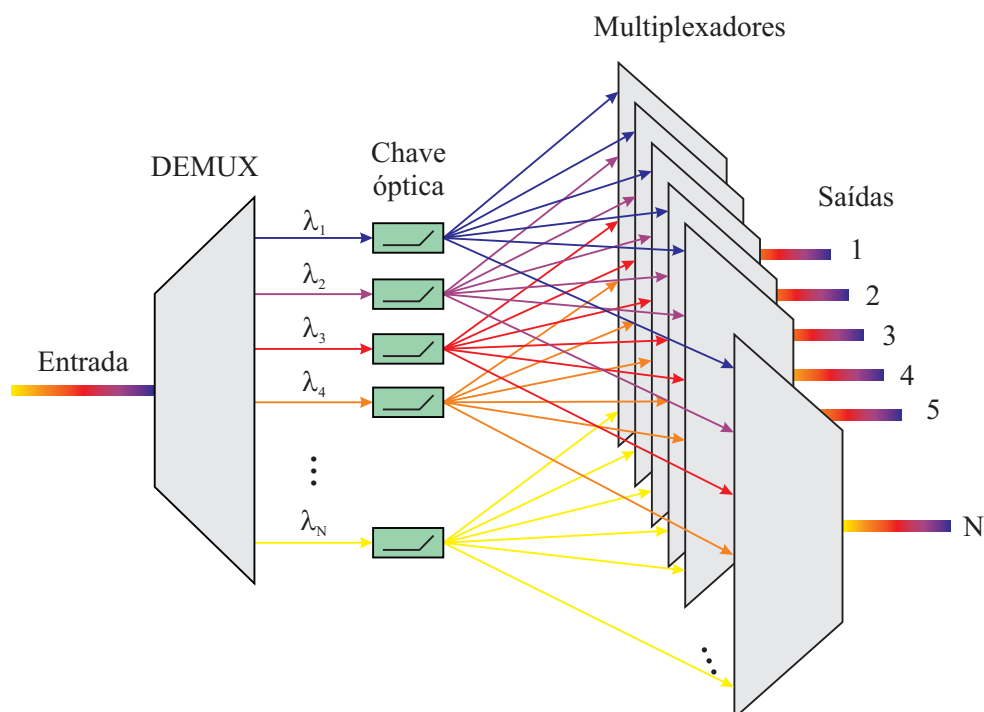


Figura 18: Representação funcional de um WSS

Os ROADM's também podem ser utilizados no intuito de fazer a interligação de redes ópticas para se obter o controle de adição e remoção de canais presentes em outras redes,

se estiverem interconectadas por exemplo. Isso possibilita a comutação de informações sem que ocorra perda de recursos, além de proporcionar reutilização de canais ópticos com níveis maiores de proteção da rede. Os ROADMs utilizados para esta finalidade utilizam uma tecnologia denominada chave seletora de comprimento de onda WSS (*Wavelength Selective Switch*) [60]. A Figura 18 ilustra um modelo funcional de WSS.

Esta chave consiste de uma estrutura que pode ser  $1 \times N$  - uma entrada e  $N$  saídas, ou ainda  $N \times 1$  -  $N$  entradas e uma saída. Ela é composta por multiplexadores e demultiplexadores e tem sua matriz de comutação composta por chaves ópticas seletoras. Em um WSS, o sinal de entrada composto por vários comprimentos de onda ao passar por um DEMUX tem os comprimentos de onda separados e podem ser direcionados para qualquer um dos MUX de saída de acordo com a posição das chaves ópticas. A seleção das chaves pode ser feita de forma remota em algumas arquiteturas [60].

As chaves ópticas podem ser baseadas em plataforma MEMS, ou LCD (*Liquid Crystal Display*), o que lhes garante ampla banda de operação [60].

### 3.4.4 OXC

Assim como o ROADM, este dispositivo permite a reconfiguração de acordo com as necessidades de tráfego. A diferença porém, está no fato de que os OADMs simples ou reconfiguráveis, são indicados para redes com topologias mais simplificadas (anel, ou estrela por exemplo) não satisfazendo as necessidades de redes robustas com um grande número de comprimentos de onda circulante como as com topologia em malha. O OXC é indicado para redes de terceira geração, além disso, não possui entradas e saídas para a retirada e inserção de canais locais.

Um OXC  $N \times W$  suporta  $N \times W$  conexões simultâneas, em que  $N$  representa o número de portas de entrada do OXC e  $W$  representa o número de comprimentos de onda [42], e suas chaves comutadoras podem operar no domínio óptico ou elétrico. A Figura 19 representa um diagrama esquemático representando um modelo funcional de OXC.

Pode-se observar, que este dispositivo faz a configuração do sinal de saída por meio do roteamento dos comprimentos de onda de entrada. Por exemplo, o sinal de saída da fibra 1, pode ser composto pelo comprimento de onda  $\lambda_1$ , cuja origem é a fibra de entrada 1, por  $\lambda_2$  oriundo da fibra de entrada 2 e assim sucessivamente até  $\lambda_N$ . O roteamento dos canais de entrada fica por conta das chaves ópticas, as quais roteiam o mesmo comprimento de onda porém de origens diferentes.

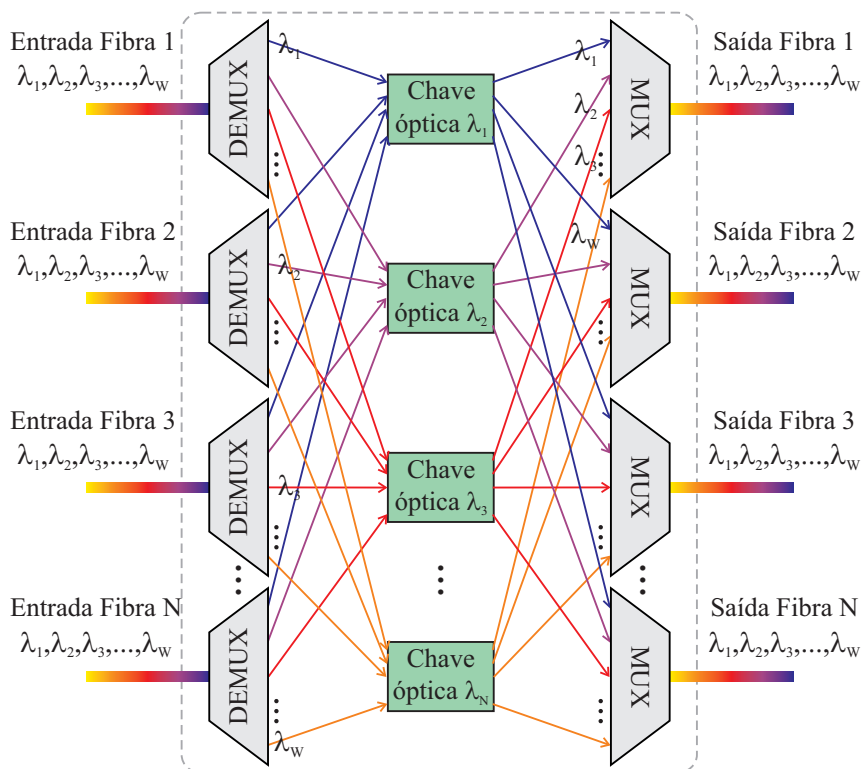


Figura 19: *Optical crossconnect - OXC  $N \times W$*

Como já mencionado, um tipo de OXC é baseado em comutação elétrica e é amplamente utilizado como uma tecnologia estabelecida. O segundo tipo usando comutação fotônica é esperado para permitir grande capacidade redes sem um grande aumento consumo de energia [43], uma vez que consumo de energia constitui uma preocupação no cenário atual em termos de custos e preservação do meio ambiente.

### 3.4.5 Comutação elétrica

O responsável pelo roteamento de um ROADM ou de um OXC, é a sua matriz de comutação. Uma matriz de comutação elétrica de grande porte é normalmente conseguida por meio da integração de elementos de comutação de portes menores. As configurações típicas dos elementos de comutação integrados são mostrados na Tabela 1, e as suas disposições são mostrados na Figura 20 [43].

Uma matriz comutadora é denominada não-bloqueante se uma porta não utilizada puder ser conectada simultaneamente a qualquer outra porta não utilizada. Assim, uma matriz não-bloqueante pode realizar toda aquisição de conexão de uma porta de entrada para uma de saída. Se existe alguma combinação de par entrada-saída que não possa ser conectada, então a matriz comutadora é denominada bloqueante. A maioria das aplicações requisita matrizes

Tabela 1: Configuração dos elementos da matriz comutadora.

<b>Configuração</b>	<b>Não-bloqueante</b>	<b>Número de elementos de comutação</b>
<i>Crossbar</i>	Amplamente	$N^2$
<i>Clos</i>	Estritamente	$4\sqrt[2]{N^{1.5}} - 4N$
<i>Benes</i>	Re-arranjável	$N \cdot (2\log_2 N - 1)/2$
<i>Spank</i>	Estritamente	$2N(N - 1)$

não-bloqueantes. Porém, mesmo entre matrizes comutadoras não-bloqueantes existem diferenças [61].

A configuração mais básica é a chamada configuração *Crossbar* (Figura 20-(a)), e trata-se de uma simples integração de elementos de comutação  $2 \times 2$ . Esta configuração tem a vantagem de amplamente não-bloqueante (*wide-sense nonblocking*), isto é, todas as conexões entre entrada e saída podem ser realizadas sem requisitar que outras conexões sejam re-arranjadas, mas nada impede que o controlador verifique a disponibilidade das portas para escolher a melhor configuração [62]. Nesta configuração, o aumento do número de elementos de comutação necessários é expressa pelo quadrado do número de portas de comutação.

A segunda configuração exibida (Figura 20-(b)) é a chamada *Clos*. Esta configuração utiliza  $k$  elementos de comutação tendo  $m$  portas nos lados de entrada e saída para configurar uma grande matriz de comutação  $N \times N$ , onde  $N = k \times m$ . Esta configuração é estritamente não-bloqueante (*strict-sense nonblocking*), por sua vez, permite que qualquer conexão entre portas de entrada e de saída não utilizadas sejam realizadas sem ao menos ter que considerar quais foram as conexões previamente alocadas na matriz comutadora. Ou seja, uma matriz estritamente não-bloqueante também é amplamente não-bloqueante, porém um amplamente não-bloqueante não é estritamente não-bloqueante [62]. Ela utiliza menos elementos de comutação que o *Crossbar*, o aumento de elementos de comutação nesta configuração é expressa por  $N^{1.5}$ .

A configuração do tipo *Benes* (Figura 20-(c)), pode diminuir consideravelmente o número de elementos de comutação, porque o aumento é expresso por  $N \cdot (2\log_2 N - 1)/2$ . Esta configuração requisita o re-arranjo de conexões, e por isso é denominada não-bloqueante re-arranjável (*rearrangeable nonblocking*). A vantagem desta configuração é o menor número de portas comutadoras necessárias, tornando-a economicamente mais competitiva. A maior complexidade do algoritmo de controle e a necessidade de interrupção de conexões para o re-

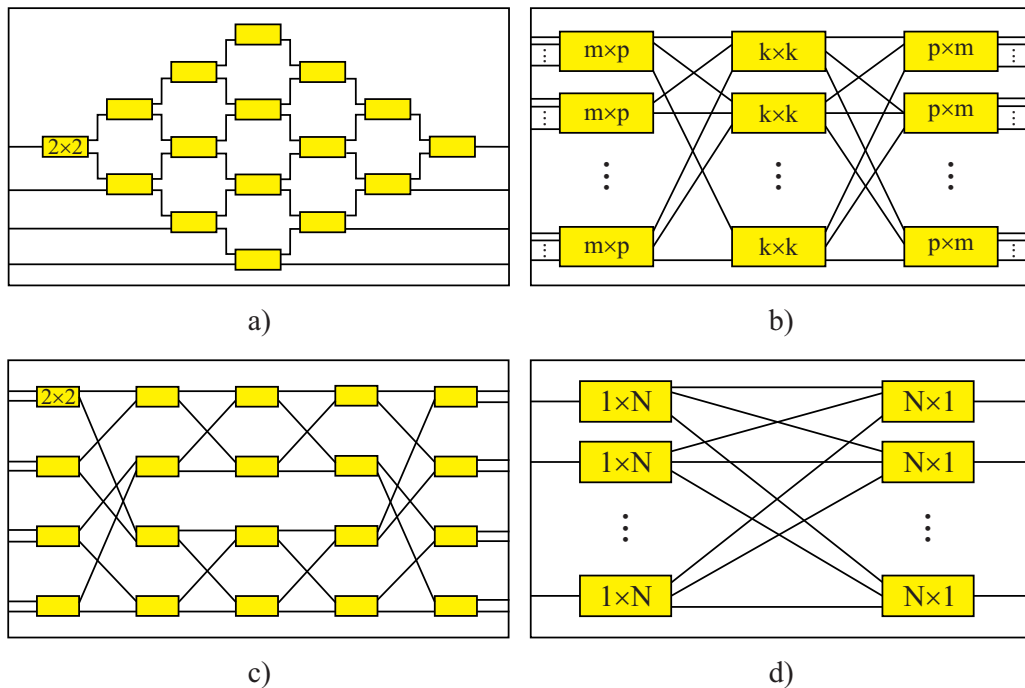


Figura 20: Configurações típicas de elementos de comutação: (a) crossbar, (b) Clos, (c) Benes, (d) Spanke

arranjo desta matriz são as principais desvantagens das arquiteturas [62].

Finalmente, a configuração *Spanke* (Figura 20-(d)) é configurada com  $1 \times N$  elementos de comutação e possui a vantagem de ter características estritamente não-bloqueantes. No entanto, se os  $1 \times N$  elementos de comutação são criados por elementos de comutação  $2 \times 2$ , o número de elementos de comutação é tão grande quanto a da configuração *Crossbar*; seu aumento é estimado como ordem de  $N^2$  [43].

### 3.4.6 Comutação fotônica

O uso de comutação fotônica em OXCs, deverá contribuir para a redução do consumo de energia no futuro em redes ópticas de grande capacidade. Isso porque comutadores fotônicos não dependem da velocidade do sinal, enquanto comutadores elétricos requerem mais potência para os sinais de maior velocidade. Além disso, a utilização deste tipo de comutação, pode conduzir a uma redução no consumo de energia por meio da eliminação dos *transponders* se a maioria dos comprimentos de onda forem comutados de forma transparente. Entretanto, a confecção de uma rede totalmente óptica, isto é, totalmente transparente, apresenta algumas dificuldades, principalmente relacionadas a complexidade, integração e custos [43]. A Figura 21 representa um OXC baseado em matriz de comutação óptica.

Ele consiste de amplificadores ópticos, MUX, DEMUX, conversores óptico-elétrico-

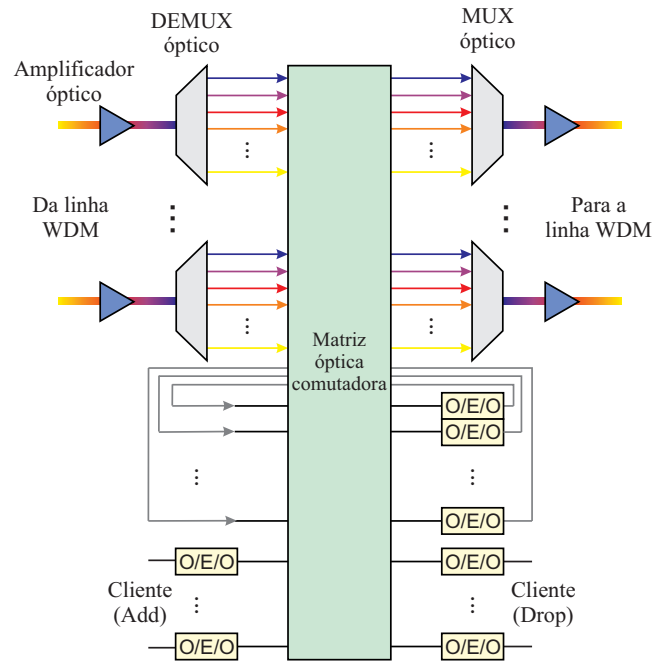


Figura 21: *Cross-connect* óptico baseado em comutação fotônica

óptico (OEO) e conversores de comprimento de onda/ ou ampliação de alcance. O número de conversores OEO, vai depender da dificuldade dos sinais em passar de forma transparente, causada por conflitos nos recursos da rede WDM com as portas de saída.

A Tabela 2 traz algumas das tecnologias utilizadas em matrizes de comutação ópticas. Com exceção da tecnologia MEMS 3D, todas as tecnologias listadas a seguir utilizam configurações do tipo *crossbar* em suas matrizes [63], [27], [28], [25].

Tabela 2: Comparação entre algumas das tecnologias de fabricação de elementos de comutação.

	Tempo de Comutação	Escalabilidade	Aplicações
Ópto-Mecânica	4ms	16 × 16	OCS, OBS limitada
MEMS Óptico	3D: ~ 10ms; 2D: ~ 3ms	3D: 1000 × 1000; 2D: 32 × 32	OCS, OBS limitada
Termo-Óptico PLC	~ 3ms	4 × 4	OCS, OBS limitada
Semicondutor Óptico	~ 30ns	4 × 4	OCS, OPS, OBS
WRS	~ 1ns	65,336 × 65,336	OCS, OPS, OBS
SOA <i>broadcast and select</i>	~ 1ns	32 × 32	OCS, OPS, OBS
SOA <i>cross point</i>	~ 1ns	4 × 4	OCS, OPS, OBS
Chave PLZT	~ 20ns	4 × 4	OCS, OPS, OBS
RAM óptica	~ 1ns	64 × 64	OCS, OPS, OBS

### 3.4.7 MEMS 2D/3D

Os sistemas micro-eleto-mecânicos MEMS são pequenos dispositivos mecânicos, geralmente compostos por substrato de silício cuja aplicação em matrizes de comutação são espelhos cujas dimensões variam de micrometros e podendo chegar a milímetros. Uma única placa de silício pode conter um grande número destes espelhos e possibilita a fabricação de matrizes interligadas por muitas por muitas portas e com custo reduzido, além de possuir baixo consumo de energia, tipicamente em torno de 5 mW [63].

Os ângulos dos espelhos MEMS são determinados utilizando sofisticadas e complexas técnicas eletrônicas, como o equilíbrio entre técnicas eletromagnéticas eletrostáticas, por meio do equilíbrio entre a torção de uma mola na articulação do espelho e da força eletrostática acionado pelo circuito de controle, ou ainda estas técnicas podem ser piezelétricas.

O modelo menos complexo, dois estados, ou MEMS bi-dimensional, exibido na Figura 22.

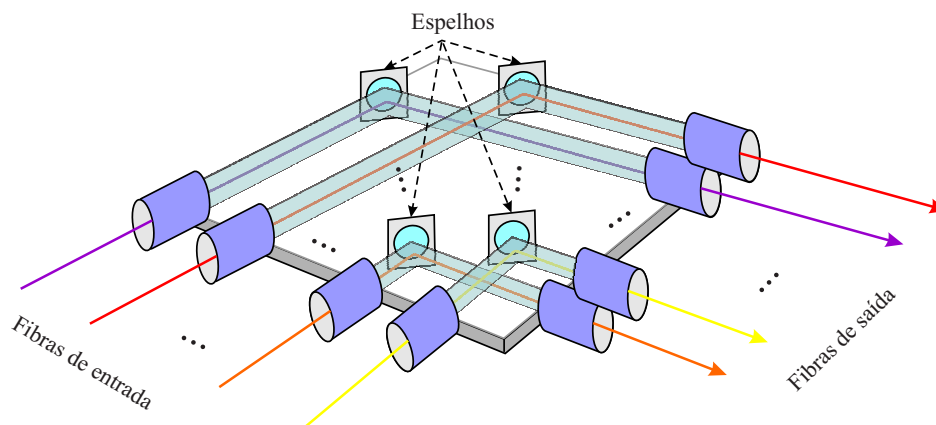


Figura 22: Configuração MEMS 2D

A matriz de comutação dos MEMS 2D, utiliza configuração do tipo *crossbar*. Os mecanismos de controle dos MEMS 2D apresentam uma maior facilidade de manipulação pois seus espelhos apresentam somente duas posições: ativados (que refletem a luz para a porta de saída desejada), e desativados (que não refletem). Um inconveniente desta configuração, é que para  $N$  entradas e  $N$  saídas, são necessários  $N^2$  espelhos. Por esse motivo esta configuração não é utilizada para um valor de  $N$  relativamente alto [53].

A solução para redes de grande capacidade, concentra-se então na tecnologia exibida na Figura 23. Nesta estrutura, o espelho é colocado em um quadro que lhe confere um grau de liberdade rotacional no eixo horizontal, e este por sua vez é colocado em um outro quadro que lhe atribui rotatividade no eixo vertical. Esta configuração aliada a um controle analógico

de posicionamento, garante que o espelho se movimente em todas as direções.

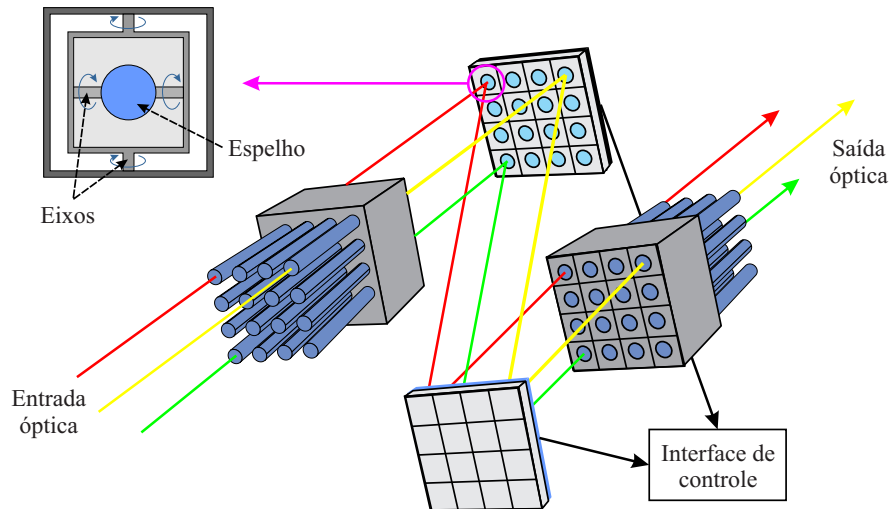


Figura 23: Configuração MEMS 3D

A confecção das matrizes de comutação da tecnologia 3D, em geral utiliza arquitetura *spank*, assim, cada espelho está associado a um comprimento de onda de entrada. Observe na Figura 23 que o comprimento de onda que chega em uma fibra é direcionado para um espelho que reflete o laser para outro espelho e assim vai para a porta de saída. Portanto para conectar a porta  $i$  à porta  $j$  basta alinhar o espelho  $i$  em direção ao espelho  $j$  e vice-versa [61].

As matriz de comutação da tecnologia MEMS 3D, é a que oferece a melhor condição para se construir redes de terceira geração pois as portas comutadoras são compactas e oferecem baixo consumo de energia. Atualmente, utilizando portas MEMS 3D conseguir dispositivos com 256 a 1000 portas de entrada e saída é comercialmente viável.

### 3.4.8 SOA

Os amplificadores ópticos SOA, podem ser utilizados como portas comutadoras *on-off* variando-se a corrente de polarização da junção. Já citado anteriormente, se esta corrente possuir valor baixo, não existe população reversa de elétrons e o dispositivo absorve o sinal de entrada, o qual é transformado em sinal elétrico (estado *off*). Caso a corrente seja suficientemente alta, o sinal é amplificado (estado *on*). Esta combinação de amplificação no estado *on* e absorção no estado *off* permite que esta tecnologia seja absolutamente poderosa fazendo a extinção de sinal *on-off*.

Uma excelente vantagem de se empregar a comutação pela tecnologia SOA, é que seu bloqueio/liberação leva cerca de 1ns o que é considerado um excelente intervalo de tempo para comutação óptica, tornando esta tecnologia ideal para redes ópticas de intenso volume de

tráfego. Além disso, vantagens como a compensação de perdas de acoplamento fazem parte desta tecnologia.

Porém, existem algumas desvantagens. Destaca-se a sensibilidade de polarização, ruído, saturação de ganho entre outras. Embora a sensibilidade de polarização possa ser reduzida tecnologicamente, o ruído e a saturação de ganho introduzem distorções no sinal, tudo isso aliado a um alto custo de produção, implicam na inviabilidade de implementação desta tecnologia por enquanto.

Diversas linhas de pesquisa concentram-se atualmente em flexibilizar a tecnologia SOA como matriz de comutação, mas pelo menos por enquanto, ela é uma solução em fase de aperfeiçoamento.

### 3.4.9 Comutação elétrica × Comutação fotônica

É possível agora, realizar um comparativo entre a tecnologia de comutação elétrica e a fotônica citando vantagens e desvantagens [41].

- O OXC por comutação fotônica representa melhor alternativa na confecção de redes ópticas totalmente transparentes, pois é bastante difícil conseguir este tipo de rede por comutação eletrônica;
- A utilização de OXCs com comutação eletrônica pode realizar a conversão de comprimentos de onda caso necessário, além do fato de que o chaveamento eletrônico é mais barato do que o óptico e limita a transmissão em valores geralmente abaixo de 2,5 Gb/s podendo chegar a um máximo de 10 Gb/s;
- O projeto de redes totalmente ópticas é mais complexo pois o sinal não é convertido para o domínio eletrônico em todo o trajeto passando por nós intermediários onde deve ser roteado corretamente;
- A tecnologia óptica ainda está em fase de desenvolvimento e assim está sujeita a possíveis falhas.

A Tabela 3 traz mais comparações:

## 3.5 TECNOLOGIA OCDM

Embora totalmente consolidada, a camada WDM como tecnologia de transporte possui limitações em relação ao número de comprimentos de onda. Esta limitação ocorre em

Tabela 3: Comparação entre nós empregando *crossconnects* ópticos × nós empregando *crossconnects* eletrônicos.

	<b>OXC Óptico</b>	<b>OXC Eletrônico</b>
Transparência	Sim	Difícil
Conversão do comprimento de onda	Difícil	Intrínseca
Taxas de Transmissão	>10 Gb/s	≤10 Gb/s
Tamanho físico do OXC	Pequeno	Grande
Projeto da camada física	Difícil	Fácil
Monitoramento	Limitado	Extenso
<b>Componentes necessários</b>		
Mux/Demux	Sim	Sim
Chaves ópticas	Sim	Não
Chaves elétricas	Não	Sim
Transmissores e receptores	Não	Sim
Conversores de comprimento de onda	Talvez	Não

função de não linearidades na camada física e baixa seletividade dos dispositivos ópticos empregados na rede, pois a ampliação do número de canais por meio da diminuição do espaçamento esbarra nos limites impostos pela estabilidade das fontes ópticas [64] e *crosstalk* gerado pelos filtros ópticos [65].

A alternativa explorada para aumentar o número de canais é utilizar outros graus de liberdade como tempo, espaço, polarização ou códigos ópticos [11]. O emprego de códigos ópticos se apresenta como uma alternativa atrativa, principalmente em função da utilização do processamento óptico das informações transmitidas e recebidas [66].

A tecnologia de multiplexação OCDM, provém da tecnologia de acesso múltiplo por divisão de códigos ópticos OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*) [11]. Acesso múltiplo pode ser definido como sendo o compartilhamento do meio em um determinado domínio (tempo, frequência, etc.). O estabelecimento de canais únicos permite que diferentes usuários ingressem e o utilizem simultaneamente, por meio das técnicas de multiplexação e demultiplexação de sinais.

O sistema OCDM pode ser dividido em sistema unipolar não-coerente, o qual é baseado somente na modulação de intensidade da potência óptica [67] e sistema bipolar coerente, o qual é baseado na modulação de amplitude e fase [5]. O desempenho de códigos coerentes é maior que dos códigos não-coerentes quando analisa-se a relação sinal-ruído mais interferência SNIR (*Signal to Noise Plus Interference Ratio*) [4]. Esse efeito ocorre porque o código bipo-

lar é ortogonal verdadeiro (*true-orthogonal*), enquanto o código unipolar é pseudo-ortogonal. Porém, a principal desvantagem do sistema OCDM coerente está nas dificuldades técnicas de implementação, concomitante com a utilização de sinais ópticos com fase deslocada [68].

No OCDM não-coerente, as informações que estão no domínio elétrico são mapeadas e transformadas em uma sequência de pulsos ópticos que são transmitidos em altas taxas. Neste sistema, cada *bit* a ser transmitido é dividido em  $L$  intervalos de tempo onde cada intervalo de tempo é denominado de *chip*. Enviando-se um pulso óptico de curta duração em alguns intervalos de *chip* uma sequência de assinatura chamada de *codeword* pode ser criada. No sistema OCDM, cada usuário da rede possui uma assinatura distinta e somente com esta assinatura a informação transmitida pode ser interpretada. Os dados codificados, são então enviados a um acoplador em estrela  $k \times k$  (numa rede local) ou então a um acoplador  $1 \times k$  (numa rede de acesso) e posteriormente transmitidos para todos os nós da rede.

O codificador de cada transmissor, representa cada *bit* “1” enviando a sequência de assinatura. O *bit* “0” não é codificado e é representado utilizando-se a sequência toda nula. Na assinatura denomina-se o comprimento do código, o número total de *chips* e o peso do código que é dado pelo número de *chips* ativos, ou seja, com valor “1” [11]. Como cada *bit* é representado por um padrão de *chips* acesos ou apagados, a largura de banda ocupada pela sequência de dados é aumentada. Desse modo, o OCDM é uma tecnologia de espalhamento espectral. A Figura 24 [11], faz uma ilustração do sistema de codificação e decodificação OCDM.

Além de garantir a segurança na transmissão de informação, o que motivou o desenvolvimento do OCDM foi a possibilidade de múltiplos usuários compartilharem simultaneamente o mesmo canal de fibra de modo assíncrono, sem *delay*, e sem a necessidade de gerenciamento centralizado de recursos (*scheduling*) [69].

A fonte dominante de ruído no sistema OCDM é o efeito *crosstalk* que é ocasionado pela interferência de acesso múltiplo MAI (*Multiple access interference*) que compartilham um canal óptico comum. Uma das maneiras de se reduzir este efeito, é fazer o dimensionamento correto dos códigos ópticos no sinal recebido. Para isso podem-se escolher códigos ópticos com boas propriedades de correlação para codificar a informação transmitida [11]. Nos sistemas CDMA sem fio, é feita a modulação em tensão, corrente, ou intensidade do campo eletromagnético por meio de códigos bipolares de sequência  $\{-1; +1\}$ , onde estes valores positivos representam amplitude ou fase destes, que podem ser diretamente detectados. Já no OCDM, a potência, ou intensidade é que é detectada. Enquanto tensão pode ser positiva ou negativa, os sistemas ópticos são de detecção não negativa [4] e os sistemas OCDM devem ser desenvolvidos com códigos não-coerentes, isto é, com sequências  $\{1; 0\}$ .

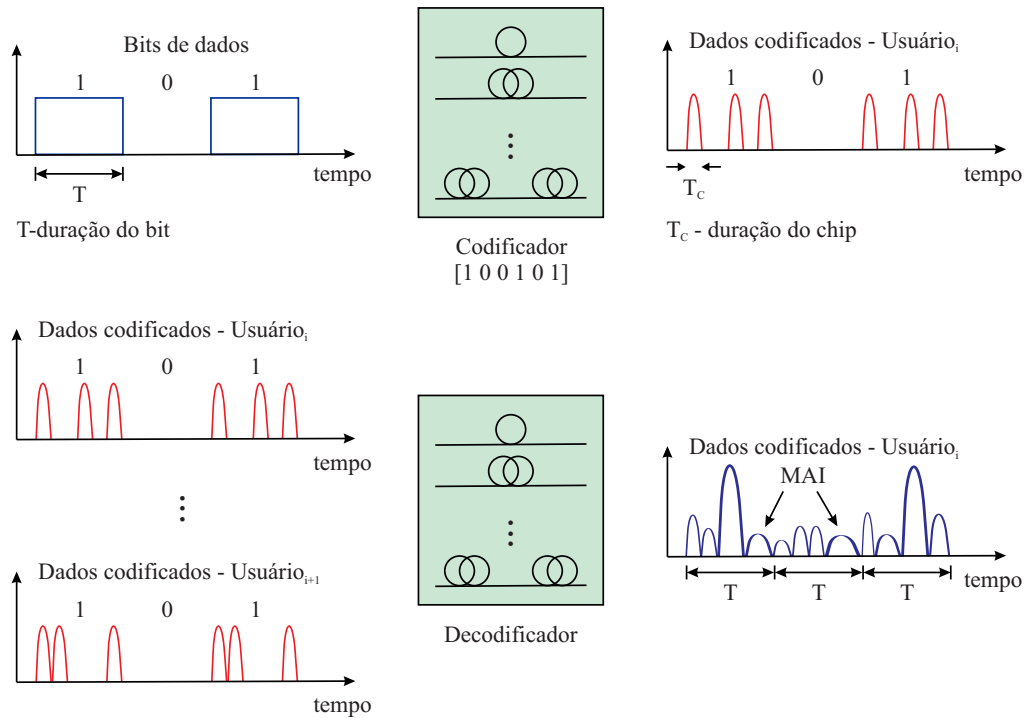


Figura 24: Sistema ilustrativo de codificação e decodificação OCDM

Os códigos ópticos não-coerentes, são códigos que fazem a combinação aditiva da intensidade luminosa de cada usuário [70], ou seja, esta forma de adição de sinais é a superposição unipolar das potências dos sinais de luz. Esta codificação emprega a presença ou ausência do sinal de luz para representar o binário “1” e “0” respectivamente [71]. Já os códigos coerentes, implementam a codificação bipolar dos sinais ópticos, ou seja, codificando a fase dos sinais ópticos com a fase da luz detectada nos terminais receptores.

Os códigos unipolares apresentam pseudo-ortogonalidade, pois manipulam sequências  $\{0, 1\}$  esparsamente distribuídas de modo a manter baixo o nível de correlação cruzada entre os sinais. Além disso, possuem uma relação sinal/ruído de interferência menor que os códigos bipolares empregados em sistemas coerentes. O fato de sistemas coerentes possuírem uma SIR de valores elevados, lhes proporciona um alto ganho de processamento, porém esta tecnologia esbarra nas limitações e dificuldades tecnológicas de aplicação [11]. Dentre os principais sistemas OCDM não-coerentes, pode-se citar codificação espectral de amplitude, espalhamento temporal e codificação bi-dimensional (2D) [24]. A Tabela 4 estabelece uma comparação entre estes códigos [11].

Uma importante classe desses códigos OCDM, são os chamados códigos ópticos ortogonais OOC (*Optical Orthogonal Code*). Trata-se de um conjunto de sequências “0” e “1” com boas propriedades de auto-correlação e correlação cruzada. Além destas características os códigos OOC apresentam facilidade de construção e implementação. Nas literaturas consulta-

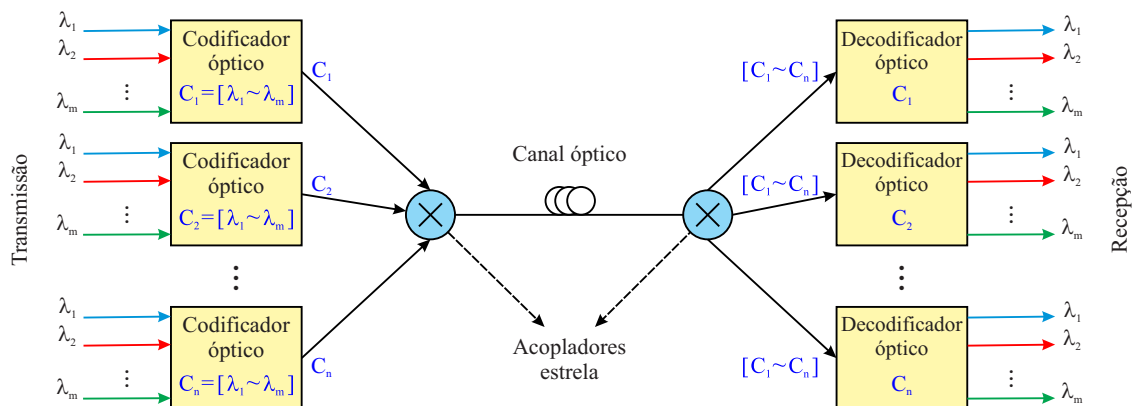
Tabela 4: Comparação entre os códigos ópticos coerentes e não-coerentes.

	Não coerente	Coerente
Tipo de código	Unipolar	Bipolar
Modulação	Intensidade	Fase
Ortogonalidade	Pseudo-ortogonal	Ortogonal
SIR	$\sim$ Chip	$\sim$ Chip <sup>2</sup>

das, verificam-se a existência de códigos OOC bidimensionais (2D) que consideram tempo e comprimento de onda, além de códigos tridimensionais (3D) que incluem também o estado de polarização. Estes códigos apresentam desempenho superior quando comparados aos códigos OOC unidimensionais por possuírem maiores graus de liberdade.

### 3.5.1 Redes OCDM

A aplicação da tecnologia CDMA em fibra óptica consiste em codificação e decodificação em meio totalmente óptico para proporcionar acessos à rede. Um esquema básico de uma rede OCDM é apresentado na Figura 25:



Número de canais = Número de códigos em um ou mais comprimentos de onda

Figura 25: Esquema básico de um sistema de codificação óptica utilizando tecnologia OCDM

A aplicação da tecnologia OCDM em fibras ópticas consiste na codificação e decodificação em meio totalmente óptico com o objetivo de se prover acesso a rede. A interconexão ópticas dos códigos é realizada dentro da rede por um acoplador em estrela. Neste tipo de rede, a informação chega a todos os usuários de forma simultânea e sem atraso o que caracteriza redes assíncronas. O codificador utiliza um ou mais comprimentos de onda para formar os códigos de acordo com o imposto por algum algoritmo. Na recepção do sinal é utilizado um dispositivo chamando de correlator óptico que possui um filtro casado. Este dispositivo possui uma cópia

do código de origem. A informação é decodificada pois existe um pulso de auto-correlação que possui a a potência maior que as dos demais pulsos dentro de um limiar. Em termos de comprimento de onda, o que diferencia o sistema WDMA (*Wavelength Division Multiple Access*) do sistema OCDM, é que no primeiro cada canal é representado por um único pulso com seu respectivo comprimento de onda, ao passo que no OCDM o comprimento de onda é utilizado apenas na composição do código.

### 3.5.2 Codificação no domínio do tempo

No sistema CDMA sem fio de transmissão, um *bit* corresponde a um pulso retangular com período de duração  $T_b$ . Ao passar pelo processo de codificação, esse período é dividido em  $L$  intervalos com duração  $T_c$ , como já mencionado chamados de *chips*. O número de *chips* ativos que possui um código é determinado pelo algoritmo de controle. Este número é geralmente chamado de ponderação ou peso do código, e representado por  $w$ . A Figura 26 ilustra a codificação de uma sequência de três bits (1 0 1) antes e após a codificação.

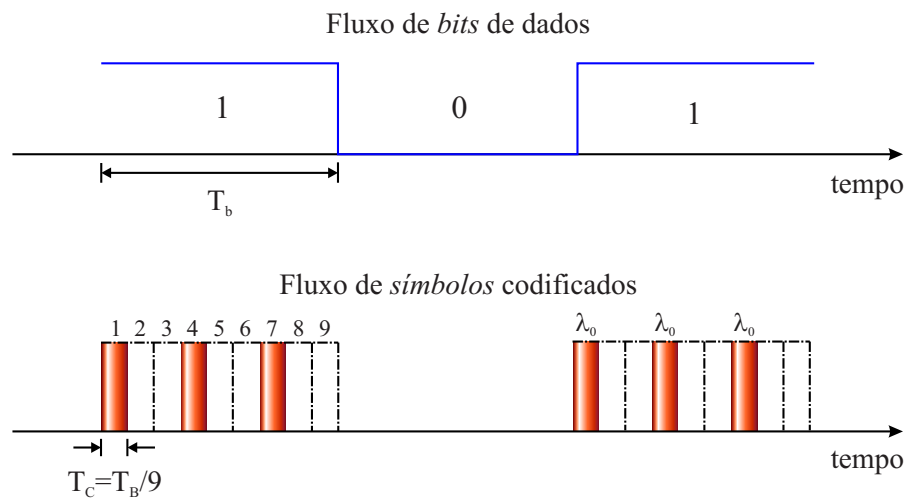


Figura 26: Fluxo de *bits* em codificação temporal.

Para o esquema dado na Figura 26 os parâmetros de codificação são  $L = 9$  e  $w = 3$  modulados em uma sequência de pulsos ópticos de comprimento  $\lambda_0$ . Esta sequência de pulsos que representa um único *bit* de informação é totalmente definida dentro do intervalo de tempo do sinal de informação que antes era representado por um único pulso no sistema convencional [72]. No sistema CDMA cada *bit* é codificado em uma forma de onda, geralmente representado por  $s(t)$  e que corresponde a assinatura do código. Cada receptor possui seu código de assinatura  $f(t)$  e este é correlacionado com o sinal  $s(t)$  enviado. A saída do receptor  $r(t)$  constitui uma operação de correlação que indica a similaridade entre  $s(t)$  e  $r(t)$  [73]. Esta operação é dada pela equação 3.1:

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)f(\tau - t)d\tau \quad (3.1)$$

Onde  $\tau$  representa o atraso entre as sequências. A maior parte dos algoritmos concentram-se em maximizar a auto correlação dos sinais  $s(t) = f(t)$  e minimizar a correlação cruzada dos códigos, ou seja  $s(t) \neq f(t)$  de modo a garantir o máximo de ortogonalidade e cardinalidade entre os sinais.

A ortogonalidade está relacionada com o grau de diferenciação entre os códigos. Para que um código seja ortogonal, as seguintes condições devem ser satisfeitas [74], [11]:

1. Para qualquer correlação não deslocada no tempo, a auto-correlação será igual ao peso do código e deve ser a maior possível de modo que o sinal recebido seja maior que o ruído do sistema;
2. Para qualquer correlação deslocada no tempo, a auto-correlação será menor que o peso do código. Esse critério deve ser satisfeito para assegurar que o sinal de saída do correlacionador óptico seja menor quando não estiver sincronizado com o transmissor, isso permite que o CDMA opere sem um sinal de *clock* global.
3. A correlação cruzada entre qualquer par de *codewords* deve ter um pequeno valor. Essa propriedade assegura que cada *codeword* pode ser facilmente identificado mesmo na presença da MAI.

Assim, sejam duas sequências que possuem comprimento  $L$ ,  $(X) = \{x_0, x_1, \dots, x_{L-1}\}$  e  $(Y) = \{y_0, y_1, \dots, y_{L-1}\}$  verificam-se os seguintes resultados de correlação discreta que representam as interações entre elas [73]:

- (a) Para a sequência  $(X) = x(\tau)$

$$|Z_{x,x}| = \left| \sum_{l=0}^{L-1} x_l x_{l+\tau} \right| = \begin{cases} w, & \text{para } \tau = 0 \\ \leq \lambda_a, & \text{para } 1 \leq \tau \leq L - 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

- (b) Para cada par de sequências  $(X) = x(\tau)$  e  $(Y) = y(\tau)$

$$|Z_{x,y}| = \left| \sum_{l=0}^{L-1} x_l y_{l+\tau} \right| \leq \lambda_c, \quad \text{para } 0 \leq \tau \leq L - 1 \quad (3.3)$$

Onde  $Z_{x,x}$  e  $Z_{x,y}$  representam a auto-correlação e a correlação cruzada respectivamente,  $L$  é o comprimento do código,  $w$  é o peso do código que é dado pelo número de *chips*

ativos, ou seja, com valor “1”,  $\lambda_a$  é o pico de auto-correlação fora de fase (lóbulos laterais que correspondem às versões deslocadas de uma mesma sequência,  $\tau \neq 0$ ) e  $\lambda_c$  é o pico de correlação cruzada entre sequências diferentes. Idealmente, a ortogonalidade seria conseguida por meio de  $\lambda_a = \lambda_c = 0$ . Entretanto, estas correlações não podem ser obtidas em sistemas ópticos pois estes são modulados em intensidade, ou seja, são não negativos. Portanto, as propostas de codificação concentram-se em minimizar  $\lambda_a$  e  $\lambda_c$ .

Se as condições acima forem satisfeitas, o sistema irá operar de forma assíncrona e com baixa taxa de erro de bit BER (*Bit Error Rate*). Mesmo considerando que poucos usuários utilizem a rede de forma simultânea, é necessário que se faça a provisão para muitos usuários operando simultaneamente. A quantidade máxima de códigos disponibilizados para uma rede está relacionada com a cardinalidade. Ela representa a quantidade máxima de usuários suportados por um conjunto de códigos com mesmo comprimento e peso, que satisfazem as condições de correlação impostas acima [74].

### 3.5.3 Os códigos ópticos ortogonais - OOC

A busca por compromissos de diferenciação e provisão de usuários levou a um pleno desenvolvimento dos códigos ópticos ortogonais (OOO). Um código OOC ideal, adota  $\lambda_a = \lambda_c = 1$  e podem ser definidos pelo conjunto de parâmetros  $(L, w, \lambda_a, \lambda_c)$ . Para o caso em que  $\lambda_a = \lambda_c = \lambda$  a cardinalidade (quantidade de códigos)  $\phi_{ooc}$  é limitada pelo teorema de Johnson dado em [74]:

$$\phi_{ooc}(\lambda) \leq \frac{(L-1) \dots (L-\lambda)}{w(w-1) \dots (w-\lambda)} \quad (3.4)$$

Os códigos OOC, são normalmente obtidos por meio de codificadores compostos por fibras de retardo (FDL) ou *lasers* que transmitem pulsos em grande velocidade. Existem várias configurações de codificadores, com fibras de retardo capazes de gerar pulsos ópticos. Uma das configurações mais utilizadas está ilustrada na Figura 27(a) [72], onde um pulso óptico é dividido em vários pulsos por um divisor de potência e cada pulso passa por fibras de retardo com períodos de atraso distintos.

A codificação consiste em uma sequência de pulsos menores, proporcional a ponderação  $w$  do código 27(b). Um conjunto de fibras de atraso similares é utilizado no receptor para construir o pulso estreito por meio de elementos de atraso conjugados 27(c). Por fim, a operação de decodificação é realizada por correlação de intensidade. Pulsos posicionados corre-

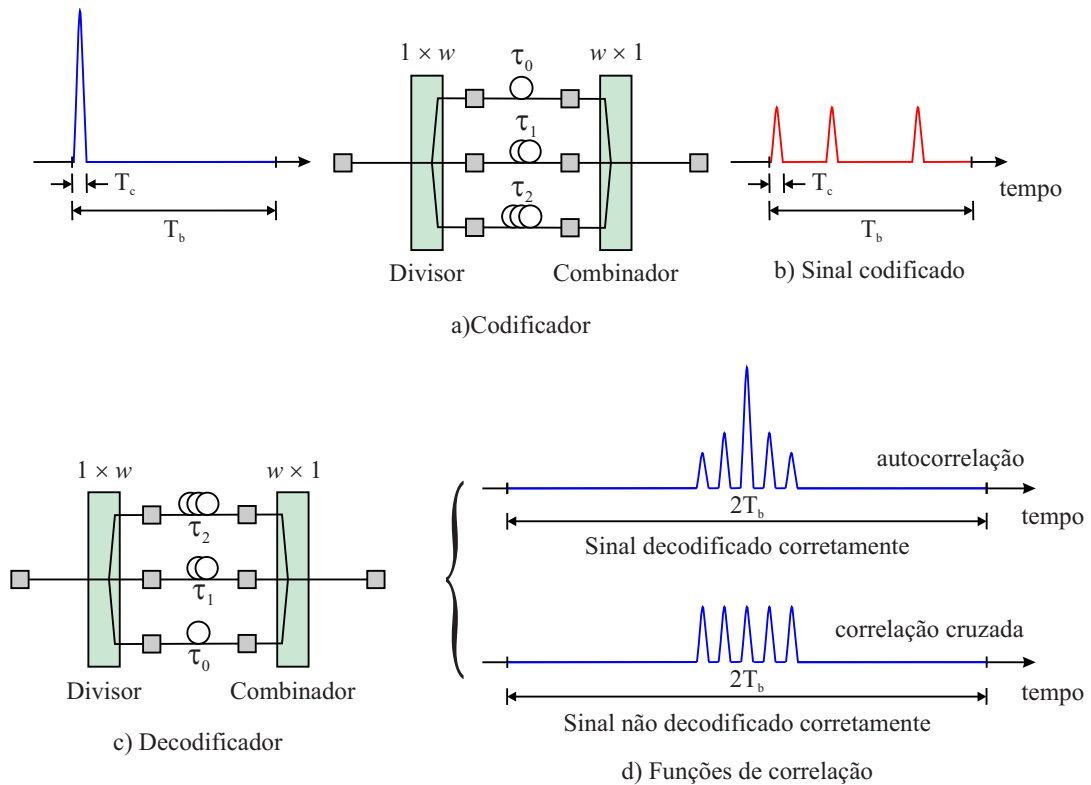


Figura 27: Codificação no domínio do tempo utilizando FDL: a) Codificador FDL; b) Decodificador FDL (correlator óptico); c) Sinal codificado; d) Funções de autocorrelação e correlação cruzada.

tamente formarão um padrão como aquele da função de auto-correlação, do contrário, formarão um sinal interferente de fundo como o padrão da função de correlação cruzada [72], ilustrado na Figura 27(d).

Em um sistema de correlação de intensidade envolvendo apenas sinais positivos, os demais usuários denominados interferentes comprometem a ortogonalidade e degradam o sistema.

### 3.5.4 Codificação no domínio da frequência

Implementações e algoritmos de codificação no domínio da frequência tem sido explorados desde a década de 1970. No domínio espectral há a possibilidade de se manipular sinais de fontes ópticas coerentes ou não-coerentes para tratamento de fase ou amplitude do sinal óptico.

Na codificação de fase espectral coerente, o princípio é a utilização de pulsos ultracurtos de fonte coerente para modular a fase das componentes espectrais. O pulso é inicialmente disperso por uma rede de difração e terá suas componentes espectrais moduladas por uma grade

de codificação que aplica diferentes deslocamentos de fase. Este processo resulta em uma distorção de tempo do pulso, configurando o *spread time* - (espalhamento temporal) do pulso de entrada [72], [75], [76].

Salehi e Weiner [76] também investigaram códigos que consistem de deslocamentos arbitrários de fase  $0$  e  $\pi$ . Estes podem ser considerados como uma multiplicação de  $+1$  e  $-1$  em amplitude, no qual  $W$  e  $\Omega$ , ilustrados na Figura 28, são as larguras de banda da portadora e do sinal respectivamente [75].

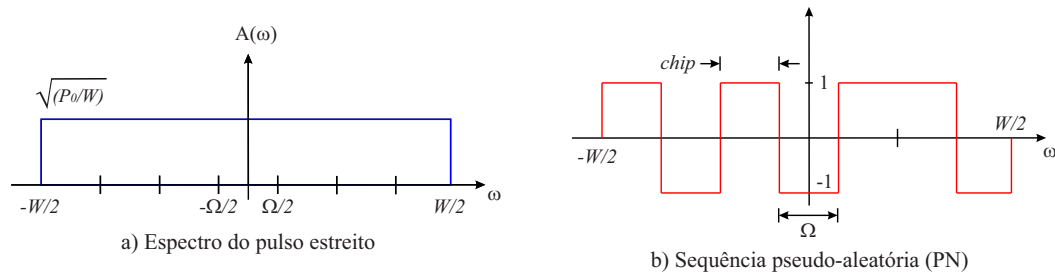


Figura 28: Domínio do tempo e frequência para um sistema com codificação de fase espectral coerente: a) Espectro do pulso estreito; b) Sequência pseudo-aleatória (PN) cuja multiplicação  $-1$  e  $+1$  em amplitude, corresponde ao deslocamento de fase  $0$  e  $\pi$  no tempo.

Na codificação, o pulso ultra-curto no domínio do tempo é transformado em um sinal de baixa intensidade e duração mais longa. A duração este pulso é aproximadamente inversamente proporcional a resolução espectral do codificador de fase. Para uma saída casada com o transmissor, a codificação de fase será removida no receptor, e um pulso estreito com alto pico de intensidade será construído. A Figura 29(a) ilustra ambos os pulsos.

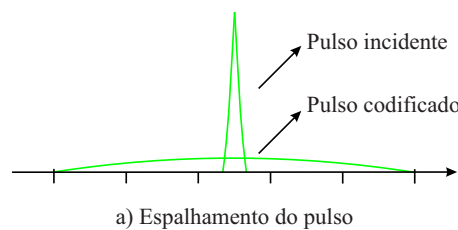


Figura 29: Pulso espalhado codificado em fase.

Os sinais descasados provenientes de outros transmissores não estarão organizados segundo nenhuma sequência no receptor, formando os interferentes de fundo. O pulso reconstruído é separado dos interferentes por meio de dispositivos de detecção limiar ou empregando óptica não-linear.

Na codificação de intensidade espectral não-coerente a motivação é que a largura de faixa do sinal independe da largura de faixa da fonte, que pode ser um diodo emissor de luz (LED) não-coerente. Assim os parâmetros que definem o código tornam-se independentes da informação a ser transmitida [77], [78].

No processo descrito na Figura 30, cada canal utiliza um codificador de amplitude espectral para bloquear ou transmitir certas componentes de frequências.

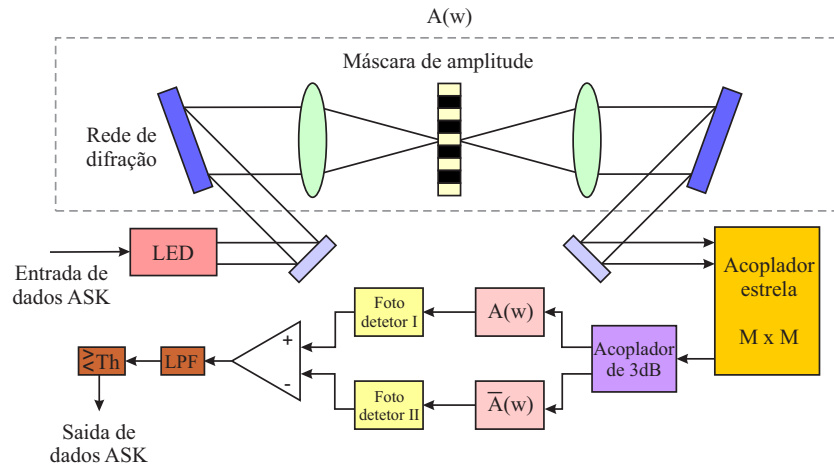


Figura 30: Sistema de codificação de intensidade espectral não-coerente em sistemas OCDM.

Parte do receptor é balanceado com dois fotodetectores, onde o sinal recebido é filtrado com o mesmo filtro de amplitude espectral do transmissor ( $A(w)$  e  $\bar{A}(w)$ ). A saída dos filtros complementares são detectadas por dois fotodetectores com conexão balanceada. Como a saída do receptor balanceado representa a diferença entre as saídas dos dois fotodetectores, sinais descasados serão cancelados, ao passo que o sinal casado é demodulado. O sinal recuperado está modulado em amplitude ASK (*Amplitude Shift Keying*), e um dispositivo de decisão limiar conclui sobre o *bit* enviado [77], [72].

A capacidade da máscara de amplitude definirá o comprimento da sequência, e assim, o número de assinantes. Este número é dado pela equação abaixo [78]:

$$N_u = \frac{1}{2} \frac{\delta\lambda}{\lambda} \frac{\pi w}{\Lambda \cos(\theta_r)} \quad (3.5)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda central da fonte,  $\delta\lambda$  é a largura espectral sendo codificada,  $w$  é o raio do feixe de entrada,  $\Lambda$  o período da rede de difração e  $\theta_r$  angulo difratado do comprimento de onda central. Para um LED com  $\delta\lambda = 50nm$  de largura espectral a meia potência,  $\lambda = 1550nm$ ,  $w = 2mm$ , rede com  $1/\Lambda = 1200$  linhas/mm, e  $\theta_r = 68^\circ$ , tem-se  $N_u = 325$  usuários. Entretanto, se fosse utilizada uma rede com  $1/\Lambda = 1800$  linhas/mm e  $w = 1,5mm$ , pode-se acomodar  $N_u = 730$  usuários [77].

Além disso, cada usuário no sistema codificado utiliza metade da potência do LED, já que a taxa de “1’s” numa sequência de máximo comprimento é  $(N_u + 1)/(2N_u) \approx 0,5$ . No sistema WDM que usa fragmentação espectral do LED, cada usuário é restrito a  $1/N_u$  da potência do LED, sendo  $N_u$  o número de usuários [77].

Devido ao fato de o LED não apresentar um espectro plano, alguns “1’s” podem ser vistos com valores diferentes dependendo da posição que assumem no espectro, o que acarretará na perda da ortogonalidade perfeita entre usuários. Uma das alternativas para a resolução deste problema, é o emprego de modulador espacial de luz (SLM) programável com dispositivos de cristal líquido (LCD) [78], de modo a obter amplitude de transmissão não binária. Podem-se atribuir diferentes comprimentos de faixas de frequências, dependendo da posição dos *chips* nos códigos, porém isso aumenta a complexidade de fabricação da máscara.

Algumas técnicas têm investigado possibilidade de se manipular sinais de fontes ópticas não-coerentes com códigos OCDMA bipolares. Uma das primeiras implementações, é uma extensão direta da técnica utilizada em rádio-frequência e requer referência de fase e correlação eletrônica [79], [72]. Outra abordagem, utiliza o chaveamento por inversão de sequência (SIK) que transmitem versões unipolares dos códigos bipolares [80], [72].

Os sistemas de codificação espectral, sofrem com o ruído de batimento (*beat noise*) que acontecem entre porções do espectro, gerando flutuações de intensidade (*speckle noise*) no fotodetector, o que resultou em um interesse em outros processos de codificação.

### 3.5.5 Codificação híbrida em tempo e frequência (W/T)

O número de usuários de uma rede usando OCDM unidimensional (1-D) não-coerente de codificação no domínio do tempo é muito limitado. Isto ocorre porque o número de assinantes é proporcional ao tamanho do espalhamento espectral, mas a taxa de dados de um único usuário, é inversamente proporcional a este tamanho, e desse modo, aumentando o número de usuários da rede, mais sérios ficam os efeitos da interferência de múltiplo acesso (MAI).

A busca por maior flexibilidade e aumento na capacidade do sistema, e a necessidade de se suprir as deficiências dos códigos OCDM não-coerentes 1-D, levou a criação de códigos baseados em tempo e frequência, também chamados de códigos 2-D. Em comparação com sistemas de codificação 1-D, os sistemas OCDM não-coerentes usando codificação W/T, não só permite o aumento do número de usuários e simultâneos na rede, melhorando o seu desempenho, mas também simplifica o controle e a gestão dela, no sentido de reduzir o tempo de processamento e aliviar a complexidade e custo de implementação de hardware.

Os códigos ópticos 2-D ( $m \times n, w, \lambda_a, \lambda_c$ ) W/T OCDMA também chamados de código óptico ortogonal de múltiplo comprimento de onda, caracterizam-se por serem representados de forma matricial  $m \times n$ , com o número de linhas  $m$ , associados ao número de

comprimentos de onda disponíveis, e o número de colunas  $n$ , relacionados com os intervalos de *chip* do código temporal. Cada usuário da rede recebe uma matriz que serve como sua assinatura de endereço. No chaveamento *on-off* padrão na comunicação OCDMA, quando o usuário deseja transmitir um bit de dados “1”, ele transmite uma sequência de pulsos em função da matriz de endereço do nó pretendido. O binário “1” na linha  $i^o$  será enviado com o  $i^o$  comprimento de onda,  $i \in [0, m - 1]$ . No entanto, nada será enviado para um dado bit “0”.

Os códigos 2-D  $(m \times n, w, \lambda_a, \lambda_c)$  W/T precisam satisfazer algumas propriedades de auto-correlação e correlação cruzada:

Sejam os códigos 2-D OCDMA,  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{y}$ , pertencentes a um conjunto  $C$ . Admitindo ortogonalidade para os diferentes comprimentos de onda utilizados, implica que os deslocamentos serão considerados apenas no tempo. Assim, com  $(0 < \tau < n)$  segue-se os seguintes resultados para as funções de correlação discreta binária 2-D:

i) Para a auto-correlação, fora de fase de  $\mathbf{x}$ :

$$Z_{x,x} = \sum_{i=0}^{m-1} \left( \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} x_{i,j \oplus \tau} \right) = \sum_{i=0}^{m-1} \left( \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} x_{i,(j+\tau) \bmod (n)} \right) \leq \lambda_a \quad (3.6)$$

ii) Para a correlação cruzada de  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{y}$

$$Z_{x,y} = \sum_{i=0}^{m-1} \left( \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} y_{i,j \oplus \tau} \right) = \sum_{i=0}^{m-1} \left( \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} y_{i,(j+\tau) \bmod (n)} \right) \leq \lambda_c \quad (3.7)$$

onde  $Z_{x,x}$  corresponde a auto-correlação e  $Z_{x,y}$  a correlação cruzada,  $\lambda_a$  é o pico de auto-correlação fora de fase correspondente aos lóbulos temporais ( $\tau \neq 0$ ), e  $\lambda_c$  o pico de correlação cruzada. A auto-correlação em fase é igual a ponderação  $Z_{x,x}(\tau = 0) = w$ . A cardinalidade depende do algoritmo utilizado em WH e TS.

Em relação a estrutura, há códigos que possuem no máximo um “1” em cada coluna de cada *codeword* na dos códigos ópticos 2-D WH/ TS, como por exemplo nos códigos MWOOC (*Multiple Wavelength Optical Orthogonal Codes*) do tipo PC/PC, PC/OOC, OOC/PC, etc. E existem códigos que possuem vários “1” em cada coluna de cada *codeword*, como por exemplo os códigos bipolar/unipolar, os códigos bipolar/bipolar entre outros. Um diagrama esquemático das matrizes das *codewords* dos códigos 2-D WH/TS são exibidos na Figura 31:

Seja  $\phi = (m \times n, w, \lambda_a, \lambda_c) \equiv \max \{ |C| \mid C \text{ é um código OCDMA 2-D } (m \times n, w, \lambda_a, \lambda_c) \}$  o limite superior sobre a cardinalidade do código 2-D, onde  $|C|$  denota a car-

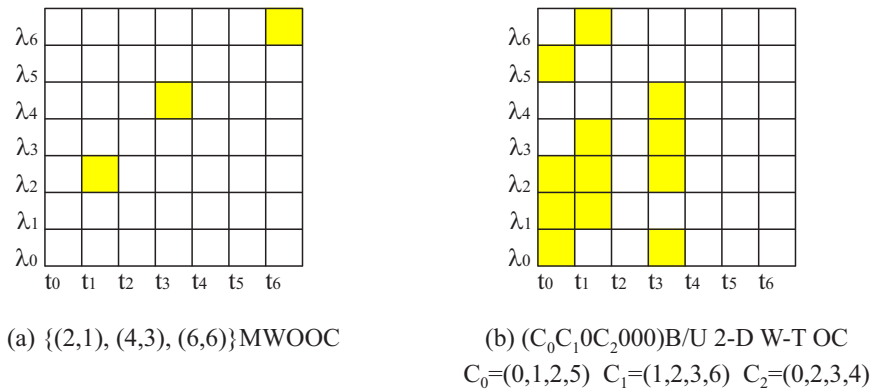


Figura 31: Diagramas esquemáticos das matrizes das *codewords* dos códigos 2-D WH/TS

dinalidade do código. Quando  $|C| = \phi(m \times n, w, \lambda_a, \lambda_c)$  o código 2-D é um código ideal. Quando  $|C|$  é aproximadamente  $\phi(m \times n, w, \lambda_a, \lambda_c)$  o código é chamado de assintoticamente ideal.

Quando o pico de auto-correlação fora de fase é igual ao pico de correlação isto é,  $\lambda_a = \lambda_c = \lambda$ , do mesmo modo como em códigos 1-D, a cardinalidade pode ser definida pelo teorema de Johnson adaptado a códigos 2-D dado pela equação 3.8:

$$\phi(m \times n, w, \lambda, \lambda) \leq \frac{m(mn - 1)(mn - 2) \cdots (mn - \lambda)}{w(w - 1) \cdots (w - \lambda)} \quad (3.8)$$

### 3.6 REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS WDM/OCDM

Embora apresente uma quantidade de benefícios, a tecnologia OCDMA como camada de transporte não é largamente explorada [81]. A tecnologia híbrida de multiplexação por divisão de comprimento de onda e por códigos ópticos (WDM/OCDM), permite a melhoria da capacidade de transmissão das redes ópticas pois permite o dimensionamento dos canais ópticos utilizáveis.

Nesta rede, a camada de transporte é composta por caminhos ópticos virtuais baseados em comprimentos de onda e códigos ópticos recebendo a designação (VOCP/VWP). Em um sistema híbrido (WDM/OCDM) são combinados pulsos ópticos que podem estar em um ou mais comprimentos de onda de modo que se forme códigos. Com esse procedimento consegue-se fazer com que cada comprimento de onda que no sistema DWDM representava apenas um usuário, seja combinado com códigos aumentando assim a quantidade de caminhos virtuais e consequentemente o número de usuários.

O conceito chave desta tecnologia é a conversão de comprimento de onda e de có-

digos ópticos. Na rede óptica WDM/OCDM existem duas vertentes na conversão dos códigos e do comprimento de onda [81], [82]: conversão de comprimento de onda sem conversão óptica em códigos e com conversão óptica em códigos. A rede de caminhos de comprimento de onda WP (*Wavelength Path*) sem conversão óptica em códigos, um comprimento de onda é atribuído ao longo de todo o caminho óptico, ou seja, o percurso óptico é identificado pelo comprimento de onda, observe a Figura 32. Do mesmo modo, nos caminhos de códigos ópticos OCP (*Optical Code Path*), um conversor óptico OC (*Optical Converter*) é atribuído ao longo de todo o percurso como mostrado na Figura 33. O uso destas tecnologias operando separadamente, implica que para estabelecer seis caminhos ópticos por exemplo, são necessários seis comprimentos de onda, no caso do caminho por comprimento de onda, e de mais seis para o caminho de códigos ópticos. Na tecnologia (VOCP/VWP) exibido na Figura 34 o conversor óptico e o comprimento de onda são atribuídos enlace por enlace. Isso implica em uma diminuição do número de comprimentos de onda e também de códigos ópticos utilizados para se estabelecer o caminho desejado possibilitando uma maior flexibilidade da rede.

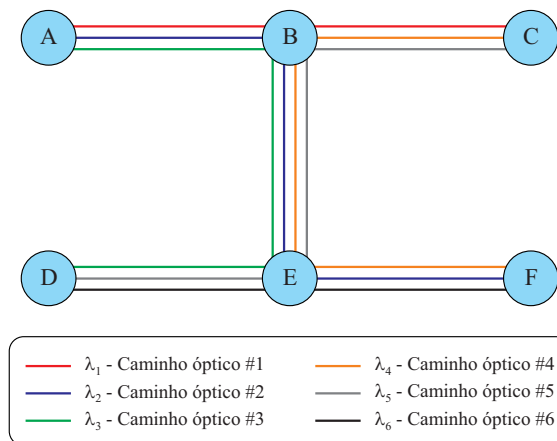


Figura 32: Caminhos virtuais de comprimentos de onda

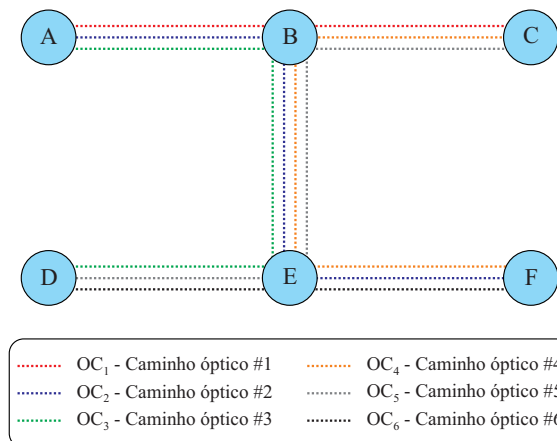


Figura 33: Caminhos virtuais de códigos ópticos

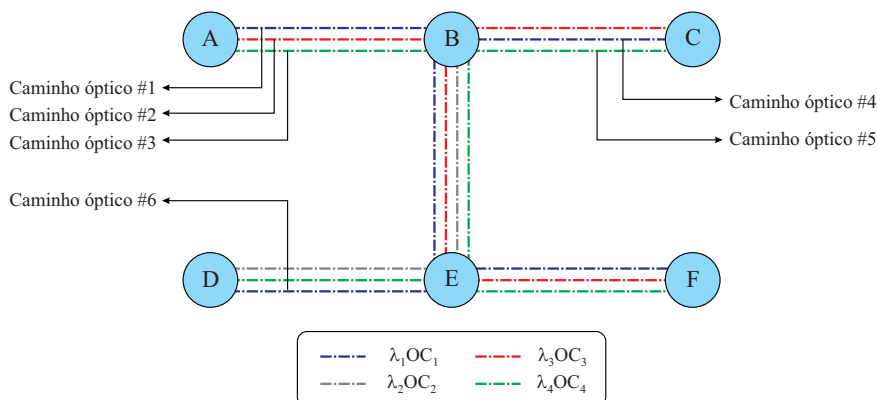


Figura 34: Caminhos virtuais de códigos e comprimentos de onda

Por exemplo, para estabelecer o caminho óptico 2  $\lambda_1$  é convertido em  $\lambda_2$  no nó B enquanto OC2 é mantido invariável. Em seguida o comprimento de onda e o código são transformados em  $\lambda_1$  e OC1. Assim, para se estabelecer os mesmos seis caminhos da Figura 32 e 33 são necessários apenas dois comprimentos de onda e dois códigos ópticos.

### 3.7 CONSUMO DE POTÊNCIA DOS DISPOSITIVOS

O desenvolvimento de modelos que considerem o consumo de energia em redes ópticas tem sido o foco de muitas pesquisas acadêmicas na última década. Pode-se dizer que o interesse pela eficiência energética nos dispositivos de tecnologia da informação e comunicação (ICT - *Information and Communications Technology*) iniciou em 2003 com um trabalho intitulado “*Green Networking*” proposto por Gupta e Singh [83]. O artigo discute o consumo de energia de dispositivos utilizados na confecção de redes e também propõe uma série de abordagens para aumentar sua eficiência energética. Desde então, muitos trabalhos relacionados foram apresentados, os quais dedicam-se a fornecer uma estimativa do consumo de energia atual e futuro, ou ainda avaliar uma proposta para redução desse consumo. Em [84] foi apresentado um artigo que faz a comparação entre elementos comutadores baseados em AWGR, WSS e SOA, no qual foi demonstrado que este tipo de tecnologia de comutação pode atingir pelo menos, uma ordem de magnitude em eficiência energética quando comparados a *datacenters* baseados em comutação elétrica. Em [1] foi apresentado um modelo simplificado de consumo de potência que pode ser utilizado em redes ópticas de grande porte onde as simulações são computacionalmente caras ou inviáveis. Neste artigo o consumo de potência de uma rede foi comparado ao consumo da mesma rede utilizando uma técnica de *bypass* óptico, o qual o nó processa apenas o sinal de interesse, reduzindo o consumo da rede. Em [85] foi avaliado o consumo de potência de redes OPS utilizando conversão de comprimentos de onda para resolver as contenções dos pacotes de saída. Este trabalho apresentou modelos analíticos de consumo de potência de redes

OPS síncronas e assíncronas em função do tráfego oferecido, além de parâmetros das chaves comutadoras e características dos dispositivos utilizados. Em [86] explora-se o limite inferior no consumo de energia comutadores ópticos e e redes, analisando o desempenho energético de vários dispositivos de comutação, e apresentando modelos quantitativos que envolvessem um valor limite sobre o consumo de energia nesses dispositivos.

As pesquisas sobre eficiência energética surgiram da necessidade de se reduzir despesas com energia elétrica e dissipação de calor associado a potência dos dispositivos, e também a emissão de gases do efeito estufa.

Entretanto, observa-se que não é trivial quantificar e identificar as oportunidades de economia de energia em redes ópticas, e nesse contexto, para que se desenvolva um modelo analítico eficiente para reduzir o consumo de potência de uma rede, conhecer os valores corretos de consumo de cada dispositivo é de fundamental importância. Portanto, esta seção se destina a fornecer valores de referência sobre consumo de potência dos dispositivos citados nas seções anteriores. Estes valores são em geral encontrados em *dada sheets* de domínio público, e foram diretamente obtidos de [1], [87].

A tabela 5 ilustrada abaixo, lista os valores de potência de vários dispositivos para a camada de transporte WDM. Na tabela,  $N$  representa o grau do nó, o qual representa o número de portas bidirecionais. O número de *add/drop* bidirecionais por porta é dado por  $a$ , e podem variar de 0 até  $N$ . Os transponders utilizados na tabela são não-coerentes. Para valores coerentes a potência seria maior, e ainda não existem informações de domínio público disponíveis. Transponders coerentes são utilizados para aumentar a distância de transmissão e a largura de banda da rede [1].

A determinação do consumo total de potência em uma rede nem sempre é feita de forma simples e intuitiva. A abordagem muitas vezes utilizada para se calcular esse consumo em uma rede com uma determinada matriz de tráfego, é baseado no dimensionamento da rede por meio de simulação. O dimensionamento implica em determinar os requisitos e capacidades de todos os equipamentos. A simplificação do problema de dimensionamento pode ser feita, por exemplo, considerando o menor caminho para se encaminhar o tráfego da rede. Como resultado do processo de dimensionamento, todos os aspectos dos equipamentos (roteadores, OLAs, transponders, etc) são conhecidos [1]. Desse modo, por multiplicação do número de dispositivos pelo seu correspondente valor de consumo, a potência total da rede pode ser calculada.

Tabela 5: Consumo de potência dos dispositivos (bidirecionais), obtidos de [1] e [87]. .

<b>Tipo</b>	<b>Observação</b>	<b>Potência (W)</b>
Transponder/Muxponder 2.5G	Por par de canal Inclui <i>overhead</i>	25W
Transponder/Muxponder 10G		50W
Transponder/Muxponder 40G		100W
Transponder/Muxponder 100G		150W
Transponder/Muxponder 400G		300W
Transponder/Muxponder 1T		500W
Regenerador xG	Por par de canal + <i>overhead</i>	2 · transponder xG
OLA, <i>spam</i> curto 2km	Por par de fibra Inclui <i>overhead</i>	65W
OLA, <i>spam</i> médio 40km		65W
OLA, <i>spam</i> longo 80km		110W
OLA, <i>spam</i> muito longo 120km		120W
EDFA, 20dBm	Por par de fibra + <i>overhead</i>	20W
Terminal WDM, 40 canais	Por par de fibra. Inclui mux/demux pré - e booster amplificador	230W
Terminal WDM, 80 canais		240W
ROADM, 40 canais 100%	Por nó. Inclui mux/demux pré - e booster amplificador Inclui <i>overhead</i>	450W
ROADM, 40 canais 50%		550W
ROADM, 40 canais 100%		600W
OXC, 40 canais, nó de grau $N$ e <i>add/drop</i> grau $a$	Por nó. Inclui mux/demux pré - e booster amplificador Inclui <i>overhead</i>	$N \cdot 85W + a \cdot 50W + 150W$
OXC, 80 canais, nó de grau $N$ e <i>add/drop</i> grau $a$		$N \cdot 85W + a \cdot 100W + 150W$
WSS $1 \times 4$	Por porta	20W
WSS $1 \times 9$		20W
WSS $1 \times 20$		20W
MEMS	Por porta	1,5W
SOA	Por porta	0,5W

## 4 METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é apresentar a modelagem matemática envolvida na proposta do trabalho, bem como a metodologia de análise da rede. Serão feitas inicialmente considerações sobre como os OXCs multi-granulares modificam a arquitetura de uma rede, e posteriormente serão apresentados conceitos relacionados a arquitetura e funcionamento de um MG-OXC-WDM, para que se faça um comparativo de custos com o MG-OXC-WDM/OCDM proposto e descrito no capítulo 2. Além disso, será apresentado um modelo de consumo de potência da rede, e também algumas considerações sobre o processo de otimização de potência das redes ópticas.

### 4.1 OXCS MULTI-GRANULARES

As redes OCS podem utilizar tecnologias de comutação de milissegundos eficientemente. Entretanto, a mesma velocidade de comutação em redes OBS, especialmente as que possuem tráfego intenso de dados, em geral provoca ineficiência e imprevisibilidade [49]. Isto é causado principalmente pela alta sobrecarga inerente a grandes intervalos de tempo necessários para configurar as chaves lentas (em geral do tipo MEMS).

Os nós dessa rede são responsáveis por estabelecer os mecanismos de conexão que consistem em sinalização, alocação de comprimento de onda e roteamento. A sinalização é utilizada para estabelecer e desconectar as *lighpaths* reservadas. A alocação de comprimento de onda determina o comprimento de onda que será utilizado para a transmissão do sinal, para que se decida que tipo de tecnologia de comutação será utilizada no roteamento da informação.

De forma genérica em redes OBS, na sinalização, existe a transmissão do cabeçalho pelo nó de ingresso na rede, antes da transmissão da informação. O cabeçalho possui informações sobre o comprimento, destino, e prioridade da rajada, e é processado eletronicamente no nó de ingresso e nos demais nós da rede. Este esquema facilita o controle eletrônico eficiente e permite que as informações transmitidas permaneçam inteiramente em domínio óptico. Este tipo de sinalização é chamada de sinalização distribuída com reserva em sentido único [88]. Dentre os protocolos que se enquadram nesta categoria de sinalização, pode-se citar o JET (*Just-Enough-Time*). Neste tipo de sinalização, existe a transmissão do cabeçalho pelo nó de ingresso na rede antes da transmissão da informação, e a rajada é transmitida sem a confirmação da reserva [89]. O intervalo de tempo decorrente entre a transmissão do pacote de controle e da

informação, é definido como  $T_{offset}$ . A Figura 35 ilustra esse processo de reserva de recursos da rede em função do tempo.

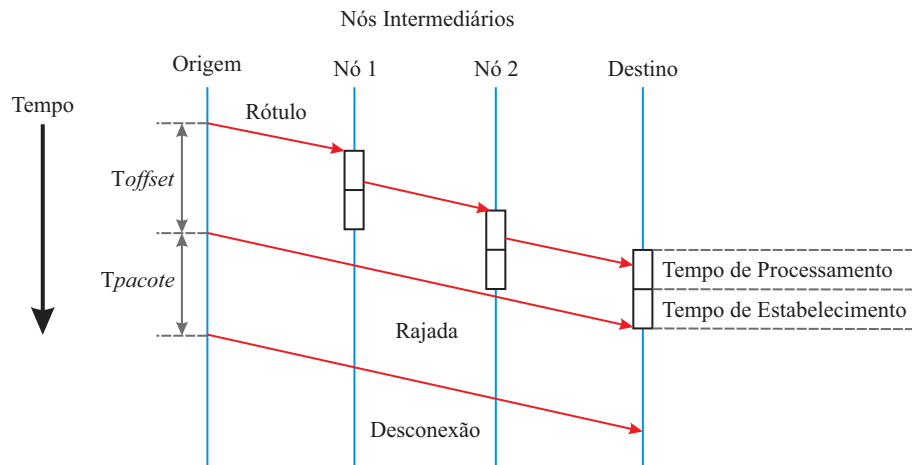


Figura 35: Processo de reserva dos recursos em função do tempo com processamento eletrônico dos rótulos, empregando protocolo de sinalização tipo JET.

Neste contexto, cabe definir que o tempo em que uma chave óptica fica ocupada, é dado pela relação  $T_{offset} + T_{pacote}$ , em que  $T_{pacote}$  é o comprimento real dos dados a serem transmitidos [9]. Como já mencionado, o tempo de comutação das chaves dos tipo MEMS é da ordem de  $10\text{ ms}$  e supre mais de 95% da quantidade de dados de um sistema de  $10\text{ Gbps}$  com dados de duração média de  $200\text{ ms}$ . Se somente 10% destes dados são transmitidos, a utilização das chaves decrescem para 67% [25]. Este efeito torna-se mais severo quando a largura de banda é aumentada ou quando dados de uma rede OPS (duração dos dados na escala de nanosegundos) precisam ser suportados [25]. A tecnologia de comutação baseada em SOA atinge velocidade de comutação da ordem de nanosegundos e é melhor adaptada para suportar a ampla faixa de tamanho de dados requeridos pelas redes OCS, OPS e OBS.

Nesse contexto, uma solução eficiente seria implementar uma rede óptica totalmente composta por conjuntos de chaves ópticas com grande escalabilidade e baixo tempo de comutação. Entretanto, esta tecnologia ainda possui custos extremamente altos, o que não torna a situação viável comercialmente, além de deixar a rede com baixa escalabilidade, como pode-se perceber observando a Tabela 2. Percebe-se que é tecnológica e economicamente viável a produção de matrizes de comutação MEMS com  $1000 \times 1000$ . Entretanto, como a tecnologia SOA é cara e complexa, suas matrizes de comutação são fabricadas para fins comerciais com exalabilidade de  $32 \times 32$  portas [28].

Assim, uma solução possível é a implementação de uma arquitetura de OXC que combina elementos de comutação lentos (por exemplo MEMS), e rápidos (por exemplo SOA). Desta forma, os algoritmos de controle podem decidir pelo provisionamento das chaves lentas

ou rápidas, e, adicionalmente, o provedor de serviço da rede pode otimizar a utilização de banda por alocação de comprimentos de onda ou *lightpaths* de acordo com as necessidades de mudança do tráfego, apresentando além de tudo, uma boa relação custo-eficácia [25], [9].

Em suma, um OXC multi-granular (MG-OXC) possui algumas vantagens em relação aos de comutação única [25]:

- Provisionamento de largura de banda e capacidade de comutação de granularidades: em fibra, comprimento e sub-comprimento de onda;
- Agilidade e escalabilidade na comutação de granularidades fornecendo uma solução dinâmica;
- Reconfiguração rápida e flexibilidade na eletrônica de controle de tecnologias de comutação;
- Boa relação de custo-eficácia, oferecendo um ótimo equilíbrio entre as tecnologias de comutação lenta e rápida.

#### 4.1.1 Metodologia de análise

A função básica de um comutador óptico é criar uma ligação entre uma porta de entrada e uma porta de saída do dispositivo. A decisão para qual porta de saída o pacote deve ser dirigido, é tomada por uma unidade de controle disponível em cada comutador óptico. Esta unidade recebe informações de controle para efetuar a reserva de recursos ao longo dos caminhos ópticos. Uma forma de realizar a análise entre a duração dos pacotes transmitidos e o tempo de comutação é considerar o modelo de reserva de recursos de redes OBS. Neste modelo, o tempo entre o cabeçalho de informações e pacote de dados é chamado de  $T_{offset}$ . Cada matriz de comutação é limitada por seu tempo de chaveamento, denominado  $T_{OXC}$ , o qual representa o tempo necessário para a configuração da conexão entre a entrada e a saída do comutador óptico para estabelecer o caminho óptico desejado. Os pacotes de dados apenas podem ser transmitidas com sucesso se  $T_{OXC} < T_{offset}$ . O tempo de duração dos pacotes é dado por  $T_{Pacote}$  e, de posse destas informações, pode-se definir o percentual de utilização da rede como [9]:

$$U\% = \frac{T_{Pacote}}{T_{Pacote} + T_{OXC}} \times 100 \quad (4.1)$$

Esta relação entre o tempo de duração das rajadas e o tempo de processamento do OXC, indica a fração máxima de tempo no qual o comutador óptico está transferindo dados.

O percentual de utilização da rede, também representa uma medida de *throughput* da mesma, e é válida para a situação na qual a perda de rajadas na rede é zero [90]. A velocidade de chaveamento da matriz de comutação, também é importante na determinação do tempo de *offset*, que pode ser determinado por [49] :

$$T_{offset} = XT_{Setup} + T_{OXC} \quad (4.2)$$

sendo que  $X$  é o número de nós da rota óptica. O  $T_{Setup}$  representa a quantidade de tempo necessário para realizar o processo de reserva dos recursos da rede e está relacionado com o tempo de processamento eletrônico e a propagação da luz ao longo das fibras ópticas.

#### 4.1.2 Modelo de Alocação de tráfego

Para inserir um MG-OXC em uma rede óptica de forma eficiente, é necessário um algoritmo de controle para fazer a atribuição dos comprimentos de onda forma apropriada, isto é, que se faça a implementação de uma partição de comprimento de onda de modo que o tráfego gerado seja direcionado ao comutador óptico mais apropriado ao tipo de tráfego a ser transmitido (lento ou rápido), sendo o algoritmo de controle executado no roteador de borda. A Figura 36 ilustra esta situação [9].

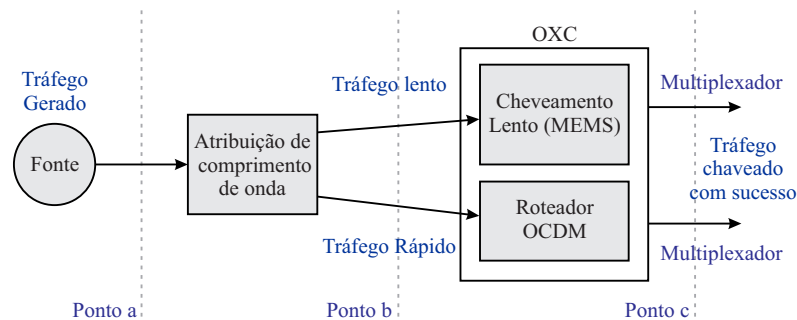


Figura 36: Visão geral dos nós de simulação

No algoritmo de controle, a taxa de chegada dos pacotes será considerada como um processo de Poisson, com média  $\lambda$ , seguindo a maioria dos modelos analíticos e classificada como tráfego lento ( $\lambda_s$ ) e rápido ( $\lambda_f$ ), por meio da inspeção do  $T_{offset}$  [25], [9]. Para o tráfego lento, considera-se que  $T_{offset} > T_{slow}$  ( $T_{slow}$  é o tempo de comutação da chave lenta), enquanto para o tráfego rápido temos que  $T_{offset} < T_{fast}$  ( $T_{fast}$  será o tempo de comutação da chave rápida). Com base nestas classificações, algumas alternativas sobre como o tráfego é distribuído nas duas partições podem ser considerados: A abordagem mais básica é a simples atribuição de comprimentos de onda, no qual os canais são classificados como lentos ou rápidos, levados ao comutador de interesse e o sinal é descartado no caso deste estar ocupado. O tráfego lento

somente pode ser alocado nos comutadores rápidos quando os comutadores lentos estiverem ocupados. A mesma situação no tráfego rápido para o lento. Entretanto, a chave lenta não pode ser configurada para direcionar um pacote rápido de dados, porém, é possível que ela solicite a mesma saída do sinal lento transmitido anteriormente, e assim, a reconfiguração não é necessária. Esta decisão é tomada pelo algoritmo de controle da rede. Por fim, a abordagem mais completa permite a transferência de dados entre as duas partições, mas apenas quando não houver comutadores livres disponíveis para a atribuição dos comprimentos de onda originais. Esta situação pode ser visualizada esquematicamente na Figura 37.

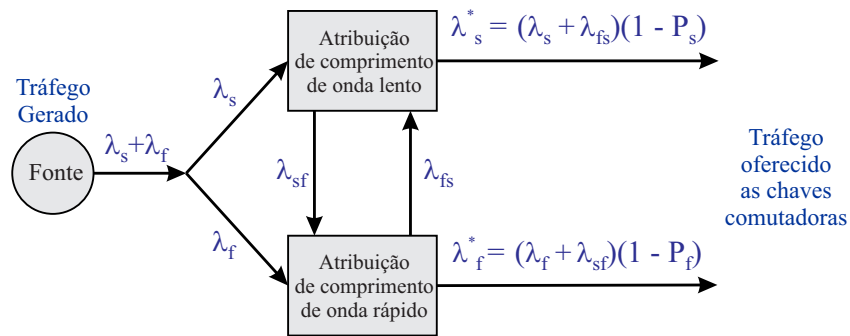


Figura 37: Visão geral da atribuição do comprimento de onda

Admite-se  $\lambda_{sf}$  para representar a taxa de transmissão do bloco de atribuição de comprimento de onda lento para o rápido, e  $\lambda_{fs}$  do rápido para o lento.  $P_s$  e  $P_f$  representam as probabilidades de bloqueio dos blocos de atribuição de comprimento de onda lentos e rápidos respectivamente, e são dadas por [9]:  $P_s = Erl\left(\frac{\lambda_s + \lambda_{fs}}{B}, W_s\right)$  e  $P_f = Erl\left(\frac{\lambda_f + \lambda_{sf}}{B}, W_f\right)$ .

Nestas expressões,  $B$  representa a largura de banda do comprimento de onda.  $W_s$  e  $W_f$  representa o numero de comprimentos de onda lentos e rápidos em cada respectiva partição.  $Erl(\cdot)$  é a função de Erlang dada pela equação 4.3 [63], [9]:

$$Erl(\rho, W) = \frac{\frac{\rho^W}{W!}}{\sum_{i=0}^W \frac{\rho^i}{i!}} \quad (4.3)$$

O algoritmo de cálculo de custo e desempenho proposto, calcula a probabilidade bloqueio para o tráfego lento e para o rápido separadamente. Na função de Erlang,  $\rho$  representa o tráfego na rede, que pode ser obtido por [91]:

$$\rho = \lambda \left( \frac{1}{\mu} + T_{offset} \right) \quad (4.4)$$

em que  $\lambda$  representa a taxa de chegada dos pacotes num determinado comprimento de onda, e  $1/\mu$  o tamanho dos pacotes de dados.

Os tamanhos dos pacotes de dados seguem uma distribuição exponencial, com uma média que varia para estabelecer a carga gerada. Assim, para controlar e avaliar a influência de diferentes tipos de tráfego, o tempo decorrente entre o pacote de controle e os dados a serem transmitidos ( $T_{offset}$ ), são modelados como uma distribuição hiper-exponencial de duas fases. A função densidade de probabilidade (PDF) é dada por [9], [25]:

$$f = \alpha \cdot f_{slow} + \beta \cdot f_{fast} \quad (4.5)$$

com  $\alpha + \beta = 1$ , em que  $\alpha$  e  $\beta$  representam frações do tráfego lento e rápido respectivamente. Na equação  $f_{slow}$  e  $f_{fast}$  representam, nesta ordem, as funções de distribuição do tráfego lento e rápido. Portanto, na Equação 4.5, os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  variam entre 0 e 1, e são utilizados para representar percentuais de tráfego.

No que diz respeito ao sistema OCDM, é importante ressaltar que o número máximo de códigos disponíveis é dado pela cardinalidade, já mencionada no capítulo 3. Ela representa o número máximo de usuários suportados por um conjunto de códigos ópticos, que possuem mesmo comprimento e peso, e que satisfazem as condições de correlação já descritas [74]. A cardinalidade destes códigos quando se considera a ortogonalidade óptica ( $\lambda_a = \lambda_c = 1$ ), faz a equação 3.4 tornar-se:

$$\phi(L, w, 1, 1) \leq \left\lfloor \frac{L - 1}{w(w - 1)} \right\rfloor \quad (4.6)$$

No caso de transmissão empregando códigos ópticos, será transmitida uma *codeword* de comprimento  $L$  para cada *bit* que o transmissor deseja enviar. Assim, a taxa de transmissão de cada usuário, será a taxa de transmissão multiplicada pelo comprimento do código óptico. O comprimento dos códigos é dado pela equação 4.7, e é obtido com 4.6, na qual a cardinalidade dos códigos OOC é indicada:

$$L \geq \lfloor C \cdot w(w - 1) + 1 \rfloor \quad (4.7)$$

onde  $w$  representa o peso do código e  $C$  o número de códigos OOC numa família de códigos ópticos com mesmo peso ( $w$ ).

O tempo de processamento óptico quando se empregam códigos OOC, foi ilustrado em [92] e é dado por:

$$T_P = \frac{1}{(L - 1)/T_c} \quad (4.8)$$

sendo  $T_c$  o período de *chip*, que é dado por  $1/(BL)$ , em que  $B$  é a taxa de transmissão. Assim, de acordo com 4.7, o período de *chip*, resulta em:

$$T_c = \frac{1}{B [C \cdot w(w - 1) + 1]} \quad (4.9)$$

De posse destas equações, pode-se por exemplo, determinar o tempo de processamento do roteador OCDM utilizado neste trabalho. Admitindo-se códigos com peso  $w = 5$  e  $C = 5$ , obtém-se um código com comprimento  $L = 101$ , e considerando-se uma taxa de transmissão  $B = 1Gbps$  [23], pode-se por meio de 4.9 e 4.8 verificar que o tempo de processamento óptico dos códigos OOC é de aproximadamente  $10^{-9}s$ , o que é comparado a velocidade de comutação da tecnologia SOA. A figura 38 ilustra o tempo de processamento em função de diferentes taxas de transmissão da rede.

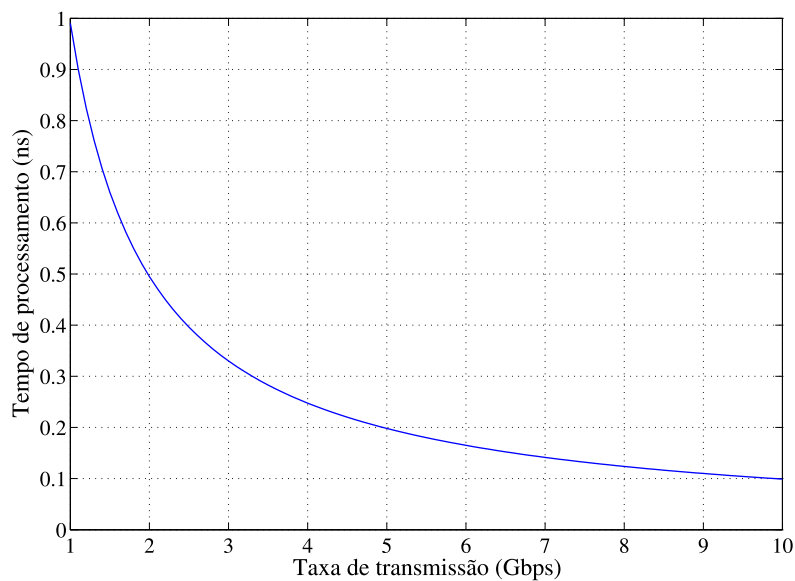


Figura 38: Tempo de processamento em função da taxa de transmissão.

A partir do tempo de processamento óptico, pode-se utilizar a equação 4.1 para investigar o desempenho da rede para a tecnologia WDM que agrega as chaves ópticas SOA e MEMS, e também para a tecnologia OCDM, uma vez o desempenho da rede está diretamente associado ao comprimento das rajadas, e ao tempo de comutação.

#### 4.1.3 Modelo de custos para a camada óptica

A camada de rede óptica, é capaz de multiplexar e transmitir sinais de diferentes canais em fibras ópticas, e de rotear estes sinais em comutadores ópticos transparentes. No

modelo adotado, uma rota óptica convencional é composta por transponders, muxponders, terminais com multiplexador/demultiplexador, bem como amplificadores ópticos e regeneradores, e também *cross-connects* ópticos e OADMs, que são usados para comunicação óptica transparente. A Figura 39 ilustra a visão esquemática deste *link*.

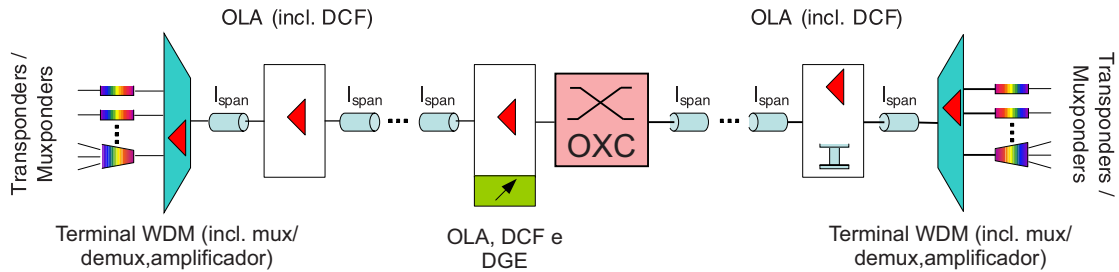


Figura 39: Visão esquemática do modelo de link óptico WDM.

O modelo de custo adotado para este trabalho é o CapEx [93]. Este modelo utiliza valores de custos normalizados para links ópticos, equipamentos e OXCs. Neste modelo, um transponder de 10 Gb/s com 750 Km de alcance tem seu custo normalizado ao valor de 1 unidade monetária (u.m.), e os demais dispositivos possuem seus custos baseados nesta padronização.

A Tabela 6 fornece a relação dos dispositivos e seus respectivos custos utilizados na rede proposta e também para a análise de custos das tecnologia MEMS e SOA separadamente [29], [94].

Tabela 6: Dispositivos e custos normalizados para o modelo de rede, obtidos de [29] e [94].

Dispositivo	Tipo	Custo
Transponder WDM 50 GHz ( $C_{Lambda}$ )	10 Gb/s, LH (Alcance 750 Km)	1,00
Transponder WDM 50 GHz ( $C_{Lambda}$ )	40 Gb/s, LH (Alcance 2500 Km)	6,00
Multiplexador ( $C_{Mux}$ )	$4 \times 10$ G, 2500 km	7,5
Regenerador 3R ( $C_{Reg}$ )	10 G, 750 km/2000 km	1,6/1,9
Regenerador 3R ( $C_{Reg}$ )	40 G, 2500 km	9,60
Amplificador Bidirecional EDFA ( $C_{Amp}$ )	ULH (80 Km <i>span</i> )	3,80
DGE <i>functionality</i> ( $C_{DGE}$ )	40 Canais	2,00
OXC Lento ( $C_{OXC}$ )	MEMS 40 Canais	$10,85 * N + 2,5$
OXC Rápido ( $C_{OXC}$ )	SOA 40 Canais	$13,12 * OXC$ MEMS
Roteador OCDM ( $C_{Rot}$ )	AWG (40 Canais) +	0,9
	WSS $1 \times 9$ (incl. Filtros e <i>splitter</i> )	4,00

No caso do dispositivo transponder, considerou-se o LH de alcance 750 Km (máxima distância sem regeneração 3R) e trata-se de um dispositivo bidirecional. No custo do mul-

tiplexador estão inclusos os custos de amplificação dos sinais ópticos (amplificador booster/pré-amplificador).

O amplificador EDFA é capaz de amplificar os comprimentos de onda em ambos os sentidos, e seu *span* é assumido como sendo 80 Km. Assim, o número necessário de EDFAs para o *link* pode ser calculado pelo quociente entre o alcance do transponder e *span* do amplificador. No caso de transmissão óptica transparente a longas distâncias ( $> 400$  Km), é necessário que se faça o condicionamento do sinal óptico. Na camada de transporte, o condicionamento do sinal significa ampliar os canais ópticos e ao mesmo tempo compensar qualquer quantidade indevida de energia que possa ser introduzida por imperfeições do EDFA, filtro óptico ou efeito de Raman no interior da fibra de transmissão. Esta tarefa é realizada por um regenerador (3G) e também por equalizador de ganho dinâmico DGE (*Dynamic Gain Equalizers*). Estes dispositivos são instalados em adição aos EDFAs, e assume-se que se coloque 1 para cada 1/4 de seu *span*. Embora, no futuro, a dispersão cromática provavelmente será compensada eletronicamente, os sistemas WDM de hoje contam com módulos de fibras de dispersão de compensação clássica (DCF), instalados nos locais de amplificação. Os valores de custos adotados no modelo, referem-se a custos de DCFs bidirecionais pelo comprimento de extensão do EDFA. Por exemplo, uma compensação de dispersão válida para a extensão de 80 km, em uma rota transparente abaixo de 750 km, equivale a 0,576 unidades de custo.

O OXC pode possuir mais de duas portas de entrada para a fibra, e seu custo está diretamente ligado a capacidade dos sistemas ópticos de linha (40 ou 80 canais), ao número de portas de entrada e saída  $N$ , e principalmente a tecnologia empregada como matriz de comutação. No caso, a tabela fornece o valor da tecnologia lenta e da rápida, necessárias ao desenvolvimento deste. O valor dos OXCs dados na Tabela 6, compreendem custos de unidades ópticas de supervisão e controle de potência óptica. O codificador OCDM, é responsável pelo roteamento do tráfego rápido, e em seus custos, encontram-se incluídos os filtros e *splitters* necessários a transmissão. O *splitter* é um dispositivo que realiza a divisão do sinal óptico proveniente de uma fibra para várias outras. A utilização destes dispositivos em uma rede óptica proporciona a arquitetura ponto-a-multiponto, ou seja, uma fibra ou cabo proveniente da central se subdivide para atendimento a inúmeros usuários em diferentes localidades.

Os valores de custo dos OXCs, compreendem os custos para os elementos de uma rede óptica completa, incluindo funcionalidades necessárias, como unidades ópticas de monitoramento e módulos de amplificação que compensem as perdas de inserção intrínsecas e associadas aos circuitos de controle de potência.

O cálculo do custo da rede WDM, pode ser obtido por meio da relação que se segue,

onde C representa custo:

$$C_{WDM} = C_{Lambda} + C_{Mux} + C_{Reg} + C_{Amp} + C_{DGE} + C_{OXC} \quad (4.10)$$

$C_{lambda}$ , representa o custo do transponder WDM que já inclui o número de comprimentos de onda por enlace e também os cabos de fibras no comprimento de seu alcance.  $C_{MUX}$  é o custo associado ao Multiplexador/Demultiplexador. O custo devido aos regeneradores é dado por  $C_{Reg}$ . Na equação,  $C_{Amp}$  representa o custo dos amplificadores utilizados e  $C_{OXC}$  representa o custo do OXC baseado na tecnologia MEMS e SOA [10].

O custo para transmissão e roteamento OCDM é obtido de maneira semelhante a WDM, fazendo:

$$C_{OCDM} = C_{Lambda} + C_{Mux} + C_{Reg} + C_{Amp} + C_{DGE} + C_{Rot} \quad (4.11)$$

onde  $C_{Rot}$  representa o custo do roteador OCDM. Uma vez que este roteador utiliza 2 AWGs para codificação/decodificação e chaves ópticas WSS para roteamento e redução da MAI, seu custo é obtido fazendo  $C_{Rot} = 2 \cdot C_{AWG} + C_{WSS}$ . Cada WSS com custo igual a 4 u.m. é capaz de suportar até 9 comprimentos de onda.

## 4.2 ALGORITMO PROPOSTO PARA O CALCULO DE CUSTOS

O algoritmo desenvolvido tem por objetivo fazer a análise de desempenho e determinação dos custos da rede. Inicialmente, foram criadas variáveis para expressar o tempo necessário para a reserva de recursos da rede ( $T_{Setup}$ ), e para o tamanho das rajadas ( $1/\mu$ ). O objetivo do algoritmo, não é fazer a alocação do tráfego de maneira automática, ficando esta, sob responsabilidade do plano de controle da rede. Portanto, a variação do percentual de tráfego rápido e lento foi feito manualmente. Após escolha do número de nós da rede, bem como do intervalo de tempo entre os pacotes de dados, utilizou-se a equação 4.2 na determinação do tempo de conexão entre a entrada e a saída dos comutadores ópticos ( $T_{offset}$ ). O tráfego da rede ( $\rho$ ), foi determinado por meio da equação 4.4.

Na determinação da probabilidade de bloqueio das rajadas ( $Erl(\rho, W)$ ), foi utilizada a relação de Erlang dada pela equação 4.3. A quantidade de comprimentos de onda alocados na partição rápida e na lenta ( $W_s$  e  $W_f$ ), também foi ajustada manualmente, afim de manter o valor calculado de probabilidade de bloqueio constante.

Uma vez determinado o tráfego e a probabilidade de bloqueio, a equação 4.1 é empregada para se determinar a utilização da rede em função do comprimento das rajadas ( $U\%$ ), assumindo para estas, o mesmo tamanho utilizado em resultados anteriores. As etapas de funcionamento do algoritmo utilizado para fazer a alocação dos comprimentos de onda, cálculo da probabilidade de bloqueio dos sinais, bem como o cálculo dos custos de implementação da rede, são descritas no fluxograma exibido na Figura 40.

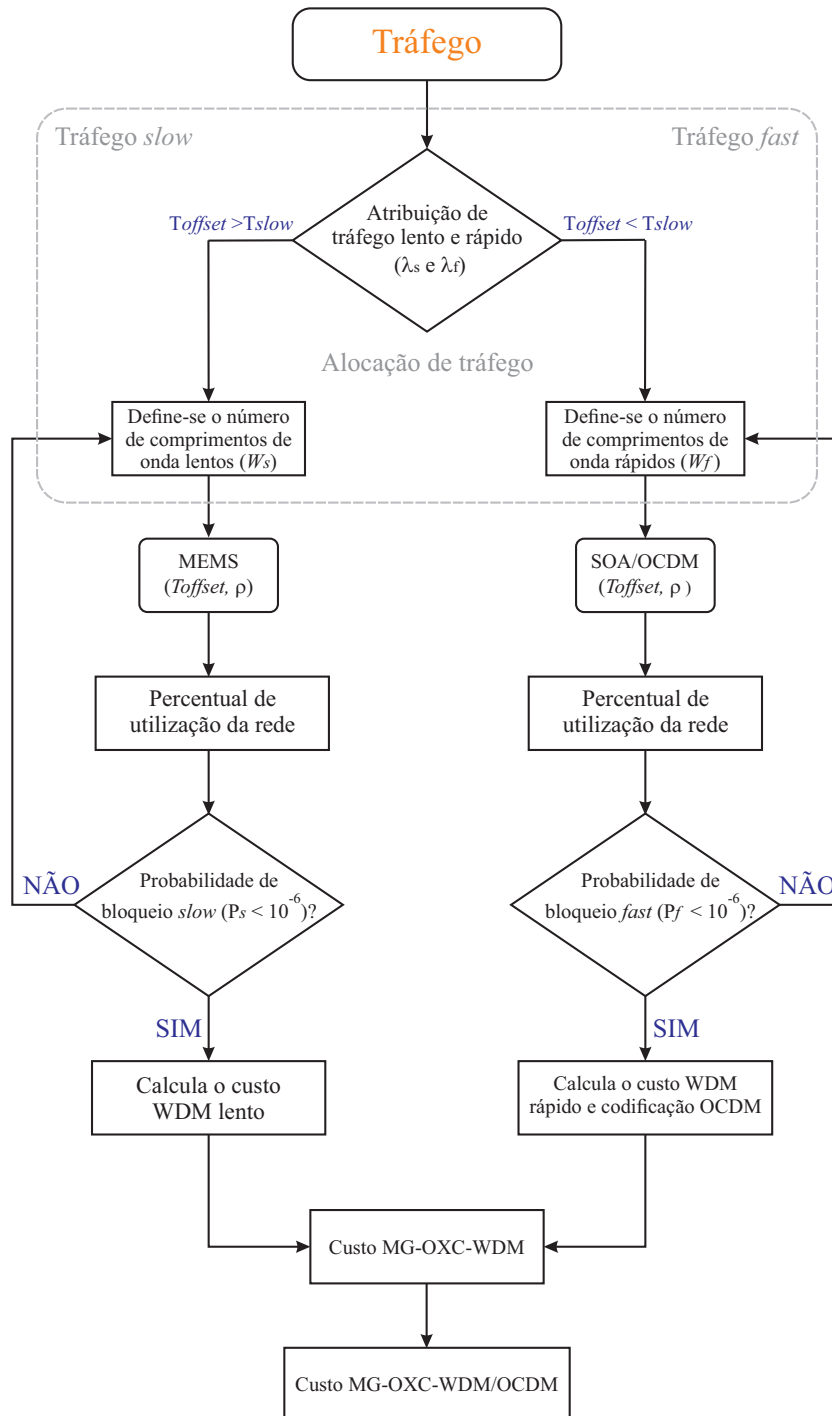


Figura 40: Fluxograma para o algoritmo desempenho/custo.

### 4.3 MODELO DE CONSUMO DE POTÊNCIA DA REDE

A rede multi-granular considerada neste trabalho, é formada por nós que possuem roteadores de núcleo ópticos interligados por links WDM/OCDM com caminhos ópticos definidos por comprimentos de onda, ou padrões de pulsos curtos [95], [96]. Os *links* são compostos por sequências de *spans*, que são compostos por fibras ópticas e amplificadores ópticos. Como já mencionado, existem vários modelos para determinar o consumo de energia da rede, e avaliar uma solução específica para a eficiência energética. No entanto, em contraste com a proposta deste trabalho, eles não se concentram nos métodos de otimização de transmissão de sinal na camada óptica [1], [97].

Este trabalho investiga o consumo de energia na camada óptica. A potência transmitida nesta camada representa aproximadamente 30% do consumo total de energia na rede óptica [1]. A camada óptica como descrita nas seções anteriores, consiste de transceptores, transponders, muxponders, regeneradores, amplificadores de linha óptica (OLA), sistemas de terminais ópticos, *add-drop* óptico, *cross-connects* ópticos e outros dispositivos passivos como codificadores/decodificadores OCDM. Os dispositivos passivos apresentam baixos níveis de consumo de energia, por isso não aparecem descritos na tabela 5.

O consumo total de potência da camada óptica  $P_{optical}$  [W] pode ser determinado pelo modelo desenvolvido em [1].

$$P_{optical} = P_{sw} + P_{tr} + P_{amp} + P_{reg} \quad (4.12)$$

onde  $P_{sw}$ ,  $P_{tr}$ ,  $P_{amp}$  e  $P_{reg}$  representam o consumo de potência do OXC comutador, transponder, amplificador e do regenerador respectivamente. O consumo de potência de cada dispositivo da camada, pode ser escrito como função da capacidade da demanda de tráfego (TD), o valor da eficiência de energia e a contagem média de saltos  $H$ , conforme ilustrado abaixo [1]:

$$P_{sw} = \eta_c \cdot \eta_{pr} \cdot N \cdot TD \cdot (2 \cdot PE_{OXC} \cdot H) \quad (4.13)$$

$$P_{tr} = \eta_c \cdot \eta_{pr} \cdot N \cdot TD \cdot (2 \cdot PE_{TR} \cdot H) \quad (4.14)$$

$$P_{amp} = \eta_c \cdot \eta_{pr} \cdot N \cdot TD \cdot \left( PE_{OLA} \cdot \left[ \frac{\alpha}{L_{amp}} \right] \cdot H \right) \quad (4.15)$$

$$P_{reg} = \eta_c \cdot \eta_{pr} \cdot N \cdot TD \cdot \left( PE_{REG} \cdot \left[ \frac{\alpha}{L_{regen}} \right] \cdot H \right) \quad (4.16)$$

onde  $\eta_c$  representa um fator para eficiência de refrigeração e consumo de energia dos dispositivos,  $\eta_{pr}$  é um fator de proteção do tráfego,  $N$  é o número de demandas de protocolos de internet (IP),  $TD$  é a capacidade média de demanda,  $\alpha$  é o comprimento do *link*,  $L_{amp}$  é o alcance do amplificador óptico,  $L_{regen}$  é o alcance do regenerador. Os valores de eficiência energética sem otimização são determinados pela razão entre os valores de potência e a capacidade de cada componente. Desse modo,  $PE_{OXC}$ ,  $PE_{TR}$ ,  $PE_{OLA}$ ,  $PE_{REG}$  são respectivamente os valores de eficiência energética do chaveador óptico, transponder, OLA e regenerador.

#### 4.4 METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE POTÊNCIA

O controle de potência em redes ópticas, é um problema de otimização, tal como ilustrado em [98]. Estudos recentes têm demonstrado a importância da consideração do consumo de potência em redes ópticas, considerando os aspectos de transmissão e infra-estrutura de rede, além de que é necessário melhorar a eficiência energética de comutação e otimizar o projeto de rede para reduzir a carga de trabalho dos comutadores e também despesas gerais [1], [97]. Trabalhos relacionados, tem mostrado uma ampla utilização de alocação de recursos e algoritmos de otimização em redes ópticas de acesso. Entretanto, estas pesquisas não vem sendo amplamente dedicadas quando se consideram redes ópticas híbridas, principalmente do tipo WDM/OCDM [98].

Neste contexto, a otimização dinâmica, com base em linha de algoritmos iterativos para realizar a otimização da SNIR, permite maior flexibilidade de rede, capacidade e alta eficiência energética com baixo consumo de energia [98]. Neste trabalho, procedimentos de otimização baseadas em otimização por enxame de partículas PSO, são propostos e investigados com o objetivo de resolver de forma eficiente a otimização de consumo de energia em redes ópticas multi-granulares sob restrições de QoS. O método de otimização baseado na abordagem PSO heurística, é atraente devido ao seu bom desempenho e baixa complexidade.

Neste trabalho, a otimização do consumo de energia baseia-se na definição de mínima restrição de energia (também chamado nível de sensibilidade), garantindo que o sinal óptico possa ser detectado por todos os dispositivos ópticos com determinada SNIR [98]. A restrição de potência máxima garante a minimização de deficiências físicas não-lineares, porque faz com que a potência global em um *link* seja limitada a um valor máximo [13]. O controle de potência em redes ópticas é portanto, um problema de otimização.

Denota-se  $\Gamma_i$  como a relação portadora-interferência (CIR) na entrada do decodificador necessário, de modo de obter uma determinada taxa de erro de *bits* máxima (BER) tolerado pelo  $i$ ésimo nó, e definindo o vetor de coluna K-dimensional da potência óptica transmitida  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_K]^T$ , o problema de controle de potência óptica consiste em encontrar o vetor de potência óptica  $\mathbf{p}$  que minimiza a função de custo  $J(\mathbf{p})$ , o qual pode ser formulada como [98], [13]:

$$\min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^K} J(\mathbf{p}) = \min_{\mathbf{p} \in \mathbb{R}_+^K} \mathbf{1}^T \mathbf{p} = \min_{p_i \in \mathbb{R}_+} \sum_{i=1}^K p_i,$$

sujeito a:

$$\Gamma_i = \frac{G_{ii} p_i G_{amp}}{G_{amp} \sum_{j=1, j \neq i}^K G_{ij} p_j + 2N_{sp}^{eq}} \geq \Gamma^* \quad (4.17)$$

$$P_{\min} \leq p_i \leq P_{\max} \quad \forall i = 1, \dots, K,$$

$$P_{\min} \geq 0, \quad P_{\max} > 0$$

onde  $\mathbf{1}^T = [1, \dots, 1]$  e  $\Gamma^*$  é a mínima CIR para alcançar um nível de QoS desejado,  $G_{ii}$  é a atenuação do OCP, levando-se em consideração a perda de potência entre os nós, de acordo com a topologia da rede. O termo  $G_{ij}$  corresponde ao fator de atenuação para os sinais de interferência do OCP no mesmo percurso,  $G_{amp}$  é o ganho total do OCP,  $N_{sp}^{eq}$  é a potência do ruído espontâneo (ASE) para cada polarização de amplificadores em cascata [99],  $p_i$  é a potência transmitida para o  $i$ -OCP e  $p_j$  é a potência transmitida para a interferência do OCP. Utilizando notação matricial, a equação 4.17 pode ser escrita como  $[\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}] \mathbf{p} \geq \mathbf{u}$ , onde  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade,  $\mathbf{H}$  é a matriz de interferência normalizada, nos quais os elementos evoluem para  $H_{ij} = G_{ij}$  para  $i \neq j$  e zero para o outro caso. Assim,  $u_i = \Gamma^* N_{sp}^{eq} / G_{ii}$ , onde existe uma versão em escala reduzida da potência do ruído. Substituindo a desigualdade pela igualdade, a solução do vetor otimizado de potência através da inversão de matriz  $\mathbf{p}^* = [\mathbf{I} - \Gamma^* \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{u}$  pode ser obtida. A matriz inversa é equivalente ao controle centralizado de energia, isto é, a existência de um ponto central no controle de potência. O nó central fornece informações sobre toda a arquitetura de rede física, como comprimento da fibra entre nós, a posição do amplificador e atualização regular para o estabelecimento do OCP, e dinâmica de tráfego. Estas observações justificam a necessidade de algoritmos de otimização de SNIR *on-line*, que têm propriedades de convergência demonstráveis para configurações gerais da rede [98], [13], [100]. O SNIR e a interferência na equação 4.17 estão relacionadas com o fator  $N_T/\sigma$ , isto é  $P_b(i) = \text{erfc}(\sqrt{\gamma_i}/2)/2$ , onde a aproximação Gaussiana é adotada, e a SNIR para cada OCP, considerando códigos óptico 2D, é dada por [98], [13]:

$$\gamma_i = \frac{N_T^2 G_{ii} p_i G_{amp}}{\sigma^2 G_{amp} \sum_{j=1, j \neq i}^K G_{ii} p_j + 2N_{sp}^{eq}} \quad (4.18)$$

em que a variação média da amplitude de correlação cruzada aperiódica é representado por  $\sigma^2$  [101].

A máxima restrição de potência garante a minimização de deficiências físicas não-lineares, porque faz com que a potência global em um *link* ser limitada a um valor máximo [98]. Neste contexto, o comprometimento dominante na SNIR será dado pelo acúmulo de ruído ASE em cadeias de amplificadores ópticos para as futuras redes ópticas [102].

A ASE  $N_{sp}^{eq}$  em amplificadores em cascata é determinada pelo modelo apresentado na Figura 41 [102]:

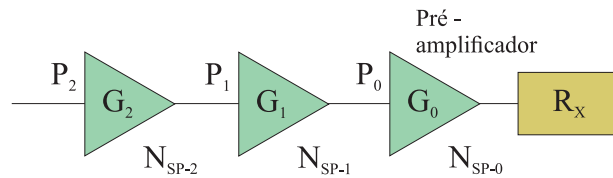


Figura 41: Amplificadores em cascata

Este modelo considera que o receptor recebe o sinal de uma ligação com amplificadores em cascata, numerados como 1, 2, ..., A partir do receptor. O pré-amplificador pode ser definido como o amplificador em cascata número 0. seja  $G_i$  ser o ganho do amplificador, isto é,  $N_{SP-i}$  será o seu fator de emissão espontânea. O *spam* entre o  $i$ -ésimo e do  $(i - 1)$  éximo amplificador tem a atenuação  $G_{ii}$ . Seja  $P_{ti}$  a potência do amplificador de  $i$ -ésimo amplificador de entrada. O fator de emissão espontânea equivalente é dada por [102]:

$$N_{sp}^{eq} = \frac{N_{sp-1} (G_1 - 1) G_{ii} G_0 + N_{sp-0} (G_0 - 1)}{G_1 G_{ii} G_0 - 1} \quad (4.19)$$

Calculando o fator  $N_{sp}^{eq}$  de forma recursiva, pode-se encontrar o ruído nos amplificadores em cascata. O ruído do  $i$ -ésimo amplificador é dado por  $N_{sp-1} = 2n_{sp} h f (G_i - 1) B_0$ , levando em consideração os dois modos polarização de uma fibra monomodo [99]. Na equação,  $n_{sp}$  é o fator de emissão espontânea, normalmente em torno de 2-5,  $h$  é a constante de Planck,  $f$  é a frequência da portadora,  $G_i$  é o ganho do amplificador e  $B_0$  é a largura de banda óptica. Idealmente, a para se reduzir a da potência de ruído ASE, a largura de banda óptica pode ser ajustada a um mínimo de  $B_o = 2R$ , onde  $R$  é a taxa de *bits*.

Uma descrição mais aprofundada sobre o funcionamento do algoritmo PSO utili-

zado, encontra-se no Apêndice A, e os parâmetros adotados na simulação serão apresentados na seção 5.5.

## 5 RESULTADOS

Esta seção destina-se a apresentar os resultados obtidos com as simulações feitas no algoritmo desenvolvido para análise de desempenho e custo, bem como os resultados do consumo de potência dos dispositivos e do processo de otimização do consumo de potência feito com o PSO. Inicialmente, será analisado como a velocidade de comutação interfere no desempenho da rede e apresentadas as discussões sobre este estudo. Além disso, será feita a análise de custos de implementação das tecnologias de comutação já citadas. Os custos levantados, serão exibidos em função dos diferentes tipos de tráfego, e serão feitos comparativos entre as tecnologias com o objetivo de demonstrar a viabilidade de cada uma. Após isso, será feita a análise de custos para duas redes ópticas com uma grande diferença de tamanho entre si. O objetivo é verificar a variação dos custos em função do diâmetro da rede, para que se decida qual das tecnologias estudadas é a mais adequada para cada uma delas.

Uma vez finalizada a análise de custos, será feita a análise para o consumo de potência. Foram calculados os custos de implementação para as mesmas duas redes utilizadas no modelo de custos sem se fazer a otimização, com a finalidade de se comparar o consumo real de cada comutador. Após isso, serão apresentados os resultados obtidos para as mesmas redes e os mesmos comutadores com o processo de otimização e uma breve discussão sobre cada um destes resultados.

A Tabela 7 sintetiza os principais parâmetros de entrada, adotados para as simulações referentes aos custos de implementação e desempenho da rede.

Tabela 7: Parâmetros de entrada para o algoritmo desempenho/custo.

Parâmetro	Valores Adotados
Tempo para a reserva de recursos ( $T_{Setup}$ )	$12\mu s$
Comprimento da Rajadas ( $1/\mu$ )	$10ns \sim 100ms$
Percentual de tráfego lento ( $\alpha$ )	$[0, 0; 0, 2; 0, 4; 0, 6; 0, 8; 1, 0]$
Percentual de tráfego rápido ( $\beta$ )	$\beta = 1 - \alpha$
Intervalo de tempo entre as rajadas <i>off</i>	$1ms$
Tempo de comutação lento ( $T_{OXC}$ )	$10ms$ (MEMS)
Tempo de comutação rápido ( $T_{OXC}$ )	$1ns$ (SOA/OCDM)
Número de comprimentos de onda <i>Slow</i> ( $W_S$ )	$12 \sim 27$
Número de comprimentos de onda <i>Fast</i> ( $W_f$ )	$3 \sim 16$

Após definição da fração do tráfego lento e rápido, e também do número de compri-

mentos de onda a ser alocado em cada partição, o algoritmo calcula a probabilidade de bloqueio. De acordo com o especificado na Tabela 7, o número de comprimentos de onda foi escolhido considerando a variação do tráfego lento e rápido da rede, de modo a se obter uma probabilidade de bloqueio de  $10^{-6}$ .

Após o cálculo da probabilidade de bloqueio e determinação dos recursos necessários da que compõem a rede, é feito o levantamento de custos das tecnologias empregadas. A determinação do custo de implementação da rede é feita em 5 aspectos:

- custo da tecnologia MEMS para os comprimentos de onda lentos;
- custo da tecnologia SOA para os comprimentos de onda rápidos;
- custo da codificação e roteamento OCDM;
- custo da tecnologia MG-OXC-WDM;
- custo da tecnologia MG-OXC-WDM/OCDM.

O custo da tecnologia MG-OXC-WDM é obtido por meio da soma dos custos das tecnologias MEMS e SOA, de acordo com a proporção do tráfego gerado. Do mesmo modo, o custo do MG-OXC-WDM/OCDM é obtido com a soma dos custos da tecnologia MEMS e do roteador OCDM.

## 5.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO DA REDE

Com o intuito de demonstrar como a velocidade de comutação dos dispositivos é fator determinante na eficiência das redes ópticas, é feito inicialmente um estudo sobre a utilização dos comutadores em função de suas respectivas velocidades de comutação, aplicando-se diferentes tamanhos de pacotes de dados. A Figura 42 ilustra essa situação. Esta figura foi obtida por meio da equação 4.1, variando-se o tamanho das rajadas de  $1 \mu s$  até  $1 ms$  e também a velocidade de comutação das chaves ópticas no algoritmo desenvolvido.

Observando-se a figura, é possível verificar a influência do tamanho dos pacotes na utilização das chaves ópticas. Pode-se perceber por exemplo, que uma chave de velocidade 10 ms (valor representativo para as chaves MEMS) possui uma utilização de aproximadamente 94% quando o tamanho médio dos pacotes é de 10 ms. Por outro lado, verifica-se que esta utilização cai para menos de 20% quando empregam-se pacotes de dados com média  $100 \mu s$ . Esta situação agrava-se mais a medida que se reduzem o tamanho destes pacotes. Em contraste,

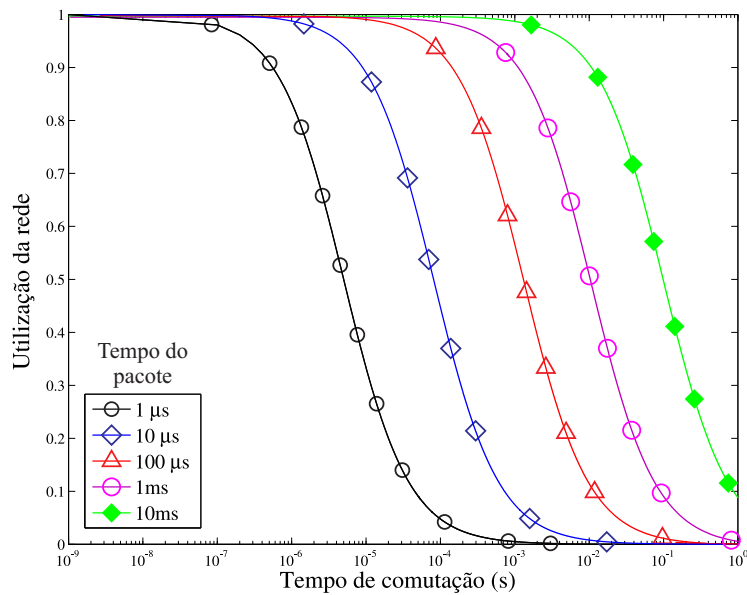


Figura 42: Utilização do interruptor óptico para diferentes velocidades de comutação e diferentes tamanhos dos pacotes.

observa-se que a tecnologia de comutação rápida é melhor adaptada para suportar os diferentes tamanhos dos dados existentes nas redes OCS, OPS e OBS.

O exemplo mostra que para suportar transferências longas de dados (redes OCS), em geral empregam-se velocidades de comutação lentas, suficientes para se obter uma utilização do comutador alta. No entanto, para transferências de dados menores (rajadas ou pacotes), um rendimento aceitável nos nós ópticos de comutação somente é conseguido por meio da utilização de comutadores rápidos. Como as aplicações atuais e emergentes geram dados de acordo com distribuições muito diversificadas (tanto no tamanho, como no instante de tempo em que estes dados são criados), torna-se uma solução necessária misturar tipos diferentes de tecnologia de comutação, compondo um comutador óptico multi-granular. Este conceito de chaveador é essencial para uma rede que precisa suportar uma ampla gama de usuários e aplicações [9]. A utilização de um comutador multi-granular, tem ainda por vantagem o fato de não apresentar complexidades, podendo ser aplicado em abordagens de camada única, ou mesmo multi-camadas.

Para verificar a eficiência de utilização da rede em função das tecnologias empregadas, apresenta-se na Figura 43 a utilização da rede em função da variação dos comprimentos dos pacotes, considerando diferentes proporções de tráfego lento e rápido.

A variação do tráfego lento e rápido foi feita de forma proporcional, embora na figura apareçam apenas os valores de  $\alpha$ , isto é, ao considerar o tráfego lento como 0,2, assume-se 0,8 como o tráfego rápido. O número de comprimentos de onda também foi variado, e os

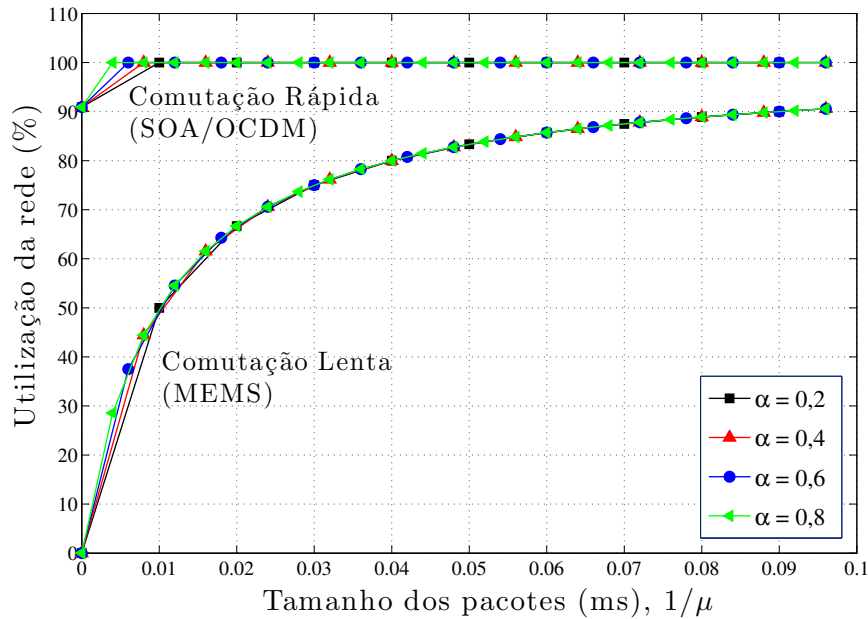


Figura 43: Utilização da rede em função do comprimento médio dos pacotes de dados considerando a comutação rápida e lenta.

parâmetros adotados para a simulação encontram-se na Tabela 8, dada abaixo:

Tabela 8: Parâmetros de variação do tráfego lento, rápido, bem como do número de comprimentos de onda lentos e rápidos.

Parâmetro $\alpha$ (Tráfego Lento)	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Parâmetro $\beta$ (Tráfego Rápido)	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,0
$N^{\circ}$ de compr. de onda Lentos $W_s$	8	12	17	22	25	27
$N^{\circ}$ de compr. de onda Rápidos $W_f$	4	5	4	4	3	3

Por meio desta figura, verifica-se que a utilização da rede é baixa quando se empregam pacotes de dados de pequeno comprimento em conjunto com a comutação lenta. Isto acontece porque o tempo de comutação das chaves MEMS possui aproximadamente o mesmo tamanho dos pacotes, podendo ser até maior. Por outro lado, pode se observar que a utilização da rede é máxima quando o tempo de comutação é reduzido, pois libera-se o tempo necessário para os nós da rede comutarem outros pacotes. A utilização da rede não varia em função do tráfego. Isto ocorre porque o tempo de processamento se mantém praticamente constante mesmo que o percentual de tráfego lento e rápido seja alterado.

Um dos parâmetros que influenciam no projeto de redes ópticas é o comprimento das rajadas aceitas pela rede. Em redes OBS convencionais, os pacotes de pequeno comprimento que chegam aos nós de ingresso são agregados com pacotes de mesmo destino para que

a rajada tenha o comprimento adequado para ser transportada. Nos nós de borda são empregados algoritmos que definem as técnicas de agregação e preenchimento das rajadas. Como pode-se perceber pela Figura 43 uma das vantagens do emprego de chaves comutadoras do tipo SOA e também do roteador OCDM, é a possibilidade da rede aceitar rajadas com menor comprimento e mesmo assim conseguir uma boa utilização.

## 5.2 CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO DOS NÓS MG-OXC

A otimização das redes ópticas, não dependem apenas da eficiência e utilização, mas também da viabilidade em oferecer esta tecnologia de forma eficaz e prática. As tecnologias atuais de comutadores ópticos, oferecem uma ampla gama de velocidades de comutação. Entretanto, observa-se que velocidades de chaveamento óptico mais elevadas, em geral, possuem duas desvantagens distintas: custo e escalabilidade. A sequência de resultados neste tópico, tem por objetivo ilustrar os resultados obtidos para os custos de implementação da rede por meio do modelo empregado.

Inicialmente é ilustrado na Figura 44 uma comparação entre os custos de OXCs baseados somente em comutadores SOA e o OXC-WDM/OCDM proposto, em função da variação dos diferentes tipos de tráfego. Os parâmetros adotados na confecção destes resultados, são os mesmos utilizados na Tabela 8, seguindo o critério  $\beta = 1 - \alpha$ . Os valores de parâmetros desta tabela foram utilizados pois, como já mencionado, são inerentes a uma probabilidade de bloqueio de aproximadamente  $10^{-6}$  para ambas as tecnologias, valor que será utilizado em todos os comparativos de custos aqui realizados.

Os valores para os cálculos de custo gerados pelo algoritmo, são os montantes normalizados citados na Tabela 6.

Por meio da Figura 44 se verifica que custo da rede empregando a tecnologia SOA, é maior que o custo da tecnologia proposta utilizando MEMS e OCDM. Por outro lado, esta diferença de custo é maior quando a quantidade de recursos para o tráfego de pacotes rápidos na rede diminui, em função do aumento destes recursos na partição lenta. Como já mencionado, a figura foi gerada com uma probabilidade de bloqueio de  $10^{-6}$  para ambas as tecnologias, porém com o mesmo desempenho, observa-se que o MG-OXC-WDM/OCDM proposto apresenta uma redução de custos que varia de 51% até 57% para os valores testados quando comparados aos custos gerados pelos comutadores ópticos SOA. Desta forma, se observa que a utilização da tecnologia OCDM apresenta um impacto positivo na diminuição do custo das redes ópticas.

A seguir, é feito um estudo que tem por objetivo relacionar a probabilidade de

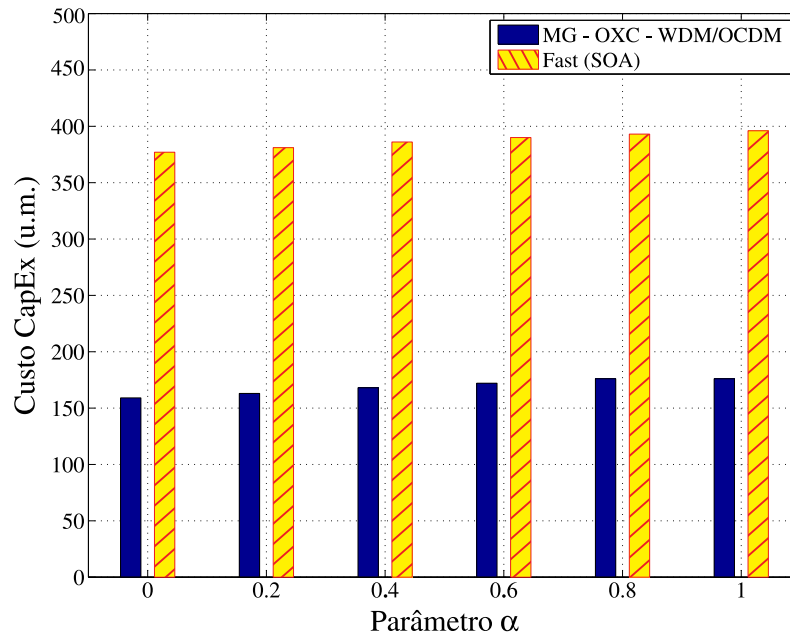


Figura 44: Custos da tecnologia proposta (MG-OXC-WDM/OCDM) e OXC utilizando SOA (comutação rápida) em função do parâmetro  $\alpha$  com probabilidade de bloqueio  $10^{-6}$ .

bloqueio da rede, e os custos da tecnologia rápida de comutação. Desse modo, a Figura 45 apresenta a variação da probabilidade de bloqueio em função dos custos, para a tecnologia OCDM (Figura 45-a), e também para a tecnologia SOA (Figura 45-b). Esta figura foi gerada mantendo-se o valor do parâmetro  $\alpha$  fixo em 0,2, e  $\beta$  em 0,8. Estes valores foram adotados, pois observou-se que alterações nestes parâmetros, não implicam em variações consideráveis de custo, sendo este dependente do número de comprimentos de onda. Assim, visando obter probabilidades de bloqueio diferentes, o número de comprimentos de onda na partição rápida ( $W_f$ ) foi variado de acordo com o exibido na figura.

Por meio desta figura, pode-se observar a economia de custos empregando a tecnologia OCDM em relação a utilização da tecnologia SOA. O número de comprimentos de onda utilizado para a fig. 45-a, e também na 45-b, foi o mesmo, visando obter o mesmo valor de probabilidade de bloqueio em ambas. Verificou-se que o aumento de recursos para alocação de um maior número de comprimentos de onda na partição rápida, reduz a probabilidade de se perder rajadas ópticas, aumentando. Por outro lado, esta redução tem como penalidade o aumento dos custos.

Uma das propostas deste trabalho, como já mencionado, é propor uma arquitetura de rede óptica que utiliza roteadores OCDM ao invés de comutadores do tipo SOA, em um modelo de OXC multi-granular, afim de se reduzir custos mantendo o mesmo desempenho. Os resultados mostram que os valores de custos obtidos na Figura 45-a representam uma economia que varia de aproximadamente 71% para uma menor quantidade de comprimentos de onda,

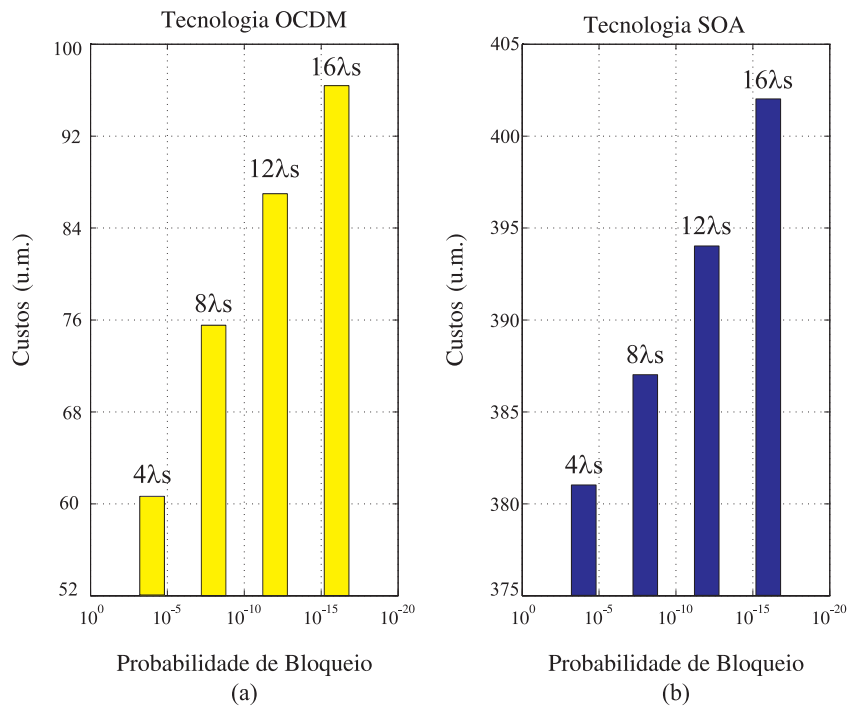


Figura 45: Variação da probabilidade de bloqueio em função dos custos da tecnologia OCDM e SOA, utilizando o mesmo número de comprimentos de onda.

podendo chegar a 82% para um maior número quando comparados aos resultados mostrados pela Figura 45-b, considerando apenas os recursos destinados ao tráfego rápido.

Por fim, é feita a comparação do custo entre o *link* WDM que contém o MG-OXC-WDM proposto na literatura, e o *link* WDM/OCDM que contém o MG-OXC-WDM/OCDM proposto neste trabalho. Esta comparação de custos é mostrada na Figura 46, dada abaixo.

Os parâmetros utilizados foram os mesmos apresentados na Tabela 8. Estes valores, como já mencionado, resultam em uma probabilidade de bloqueio de aproximadamente  $10^{-6}$  para ambos os tipos de tráfego. Parte dos valores obtidos por meio das simulações utilizando estes parâmetros, foram utilizados para construir a Figura 43 onde o objetivo era a análise de desempenho da rede. Nesta análise, o objetivo é fazer um comparativo de custos entre os dois MG-OXC sob as mesmas condições de teste, portanto os mesmos resultados para probabilidade de bloqueio e desempenho foram utilizados. Do mesmo modo como nos resultados anteriores, o percentual de tráfego foi variado de forma proporcional.

O custo da tecnologia proposta em [9] no algoritmo, é determinado por meio da relação  $C_{Fast} + C_{Slow}$  caracterizados pelos custos das tecnologias SOA e MEMS respectivamente, ao passo em que o custo do MG-OXC proposto é determinado por meio da relação  $C_{OCDM} + C_{Slow}$  respectivamente. Estes custos foram determinados aplicando as equações 4.10 e 4.11 utilizando os valores CapEx citados na Tabela 6 citados no capítulo anterior.

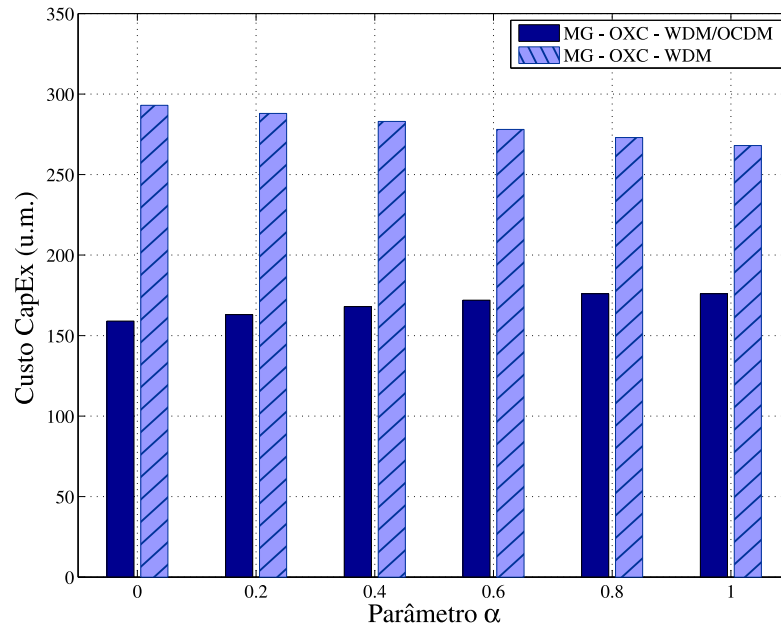


Figura 46: Custos das tecnologias MG-OXC-WDM/OCDM (Proposta) e MG-OXC-WDM em função da fração de tráfego lento

Devido ao fato dos custos OCDM serem mais reduzidos em comparação ao custo SOA (conforme análise feita na Figura 45), é possível observar na Figura 46 que a tecnologia MG-OXC-WDM/OCDM proposta, apresenta um custo de implementação reduzido em relação a tecnologia MG-OXC-WDM, principalmente quando a maior parte do tráfego da rede é composto por pacotes pequenos (tráfego rápido -  $\alpha = 0,2$ ), apresentando uma variação de custo de aproximadamente 43 %. Por outro lado, a variação de custo diminui para 35 % quando a maior parte do tráfego da rede é composto por pacotes longos (tráfego lento -  $\alpha = 0,8$ ), o que evidencia a vantagem da aplicação da tecnologia OCDM em redes ópticas híbridas quando se trata de custo/benefício.

### 5.3 ANÁLISE DE CUSTOS DE REDES ÓPTICAS COM MG-OXC

Para verificar a viabilidade econômica do comutador óptico proposto, o modelo de custos foi aplicado em duas topologias de redes ópticas: a rede da Finlândia, e a rede NSFNET (EUA). O motivo para escolha destas duas topologias, é que o diâmetro da rede da Finlândia é muito menor em relação ao diâmetro da rede NSFNET. A intenção é verificar como o custo de implementação de uma rede varia em função de seu tamanho físico, para que se decida qual tecnologia apresenta melhor viabilidade de implementação em cada tipo de rede.

Uma forma de se medir o tamanho da rota óptica, é considerar a distância geográfica em quilômetros. O comprimento do enlace e o número de nós entre eles, determina o diâmetro da rede, que é definido como o maior caminho mínimo para se transmitir um pacote de dados. A

distância média da rede é obtida por meio da razão entre o comprimento de todas as rotas juntas e o número de nós existentes na rede. Algoritmos desenvolvidos para solucionar problemas de otimização de rotas de transporte como o Dijkstra por exemplo, consideram um modelo de caminho mínimo SP (*Shortest Patch*), no qual determinam a menor distância entre o nó de origem até o nó de destino [82].

O *backbone* da Finlândia possui 12 nós e 19 enlaces bidirecionais. Tem um diâmetro de 290 km e uma distância média de 132,3 km como exibido na figura 47.

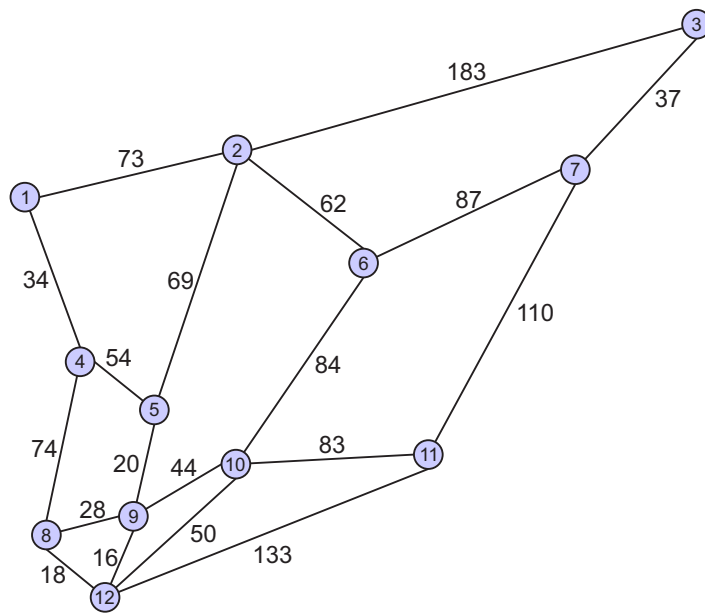


Figura 47: Topologia de rede da Finlândia.

O *backbone* NSFNET (EUA) possui 14 nós e 21 enlaces bidirecionais. Tem um diâmetro de 5316 km e uma distância média de 1083 km como exibido na figura 48.

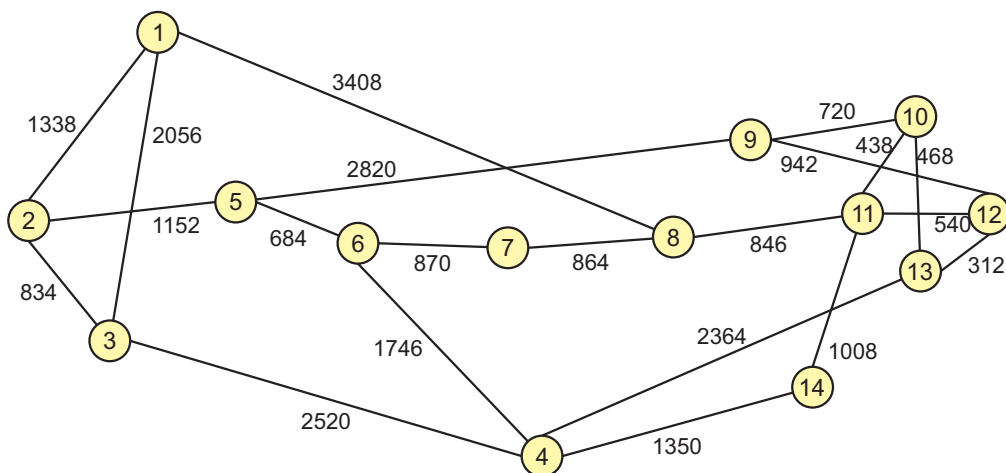


Figura 48: Topologia de rede NSFNET (EUA).

O cálculo do custo total das redes, foi feito por meio da somatória dos custos de

cada uma das rotas ópticas individualmente. Independente do tamanho da rota, seu custo foi estabelecido por meio das equações 4.10 e 4.11 utilizando os custos de acordo com as características de cada dispositivo citado na tabela 6. Os parâmetros da simulação foram os mesmos das tabelas 8 e 7.

### 5.3.1 Custos da Rede da Finlândia

Inicialmente foi considerada a diferença de custos entre o MG-OXC-WDM/OCDM proposto, e um OXC constituído apenas pela tecnologia SOA. Como nenhuma das rotas ópticas possui uma distância superior a 750 km, o transponder e o regenerador utilizados nas simulações foram os de 10 G/750 km, que possuem respectivamente os custos de 1,00 e 1,60 conforme descritos na tabela 6.

Os resultados obtidos considerando-se a variação de 0% até 100% do tráfego na rede são exibidos na figura 49, dada logo abaixo.

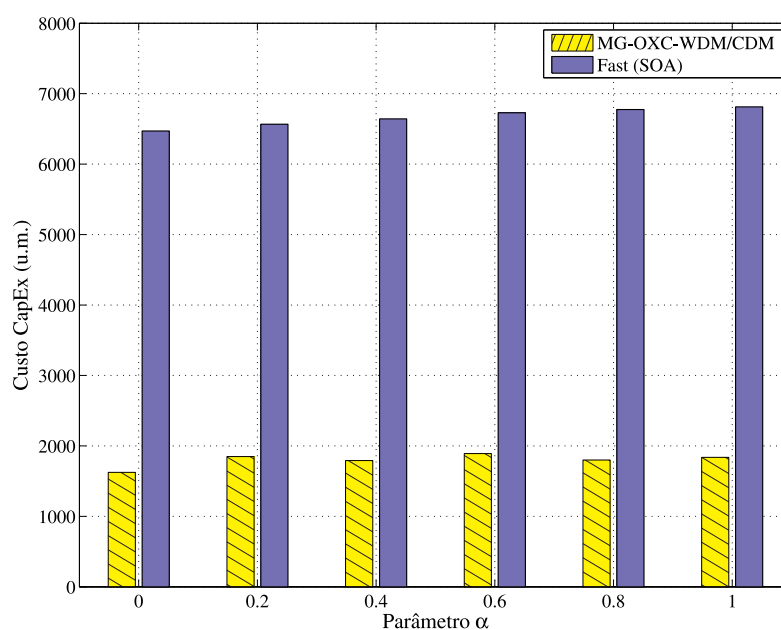


Figura 49: Custos das tecnologias MG-OXC-WDM/OCDM e SOA para a rede da Finlândia em função dos diferentes tipos de tráfego.

No estudo anterior quando se considerou apenas uma rota óptica, o custo da tecnologia SOA mostrou-se bem mais elevado em relação a tecnologia MG-OXC-WDM/OCDM. Por meio da figura acima, pode-se perceber que considerando-se uma rede óptica completa, esta situação se repete. A diferença de custos da tecnologia rápida em relação a proposta atingiu valores que variam entre 72% até 75% dependendo do percentual de tráfego. Isso se justifica porque a tecnologia SOA possui custo bem mais elevado em relação ao roteador OCDM.

No intuito de consolidar a tecnologia proposta nesse trabalho, é feito novamente um comparativo de custos entre o MG-OXC-WDM/OCDM e o MG-OXC-WDM encontrado na literatura, porém aplicado ao cenário de simulação da rede finlandesa. Os resultados obtidos são ilustrados na figura 50.

De acordo com a figura, é possível observar que o custo do MG-OXC-WDM/OCDM proposto, é bem mais baixo em relação ao encontrado na literatura. Todo o cálculo de custos desta rede foi feito levando-se em consideração uma probabilidade de bloqueio de aproximadamente  $10^{-6}$ . Este valor foi mantido para que se garantisse as mesmas condições de testes entre as tecnologias para avaliar seus custos. O que observa-se até aqui, é que de todas as tecnologias testadas para a comutação óptica em redes com topologia malha (MEMS, SOA, OCDM), o MG-OXC-WDM/OCDM foi o que apresentou a melhor relação custo-benefício, consolidando-o como excelente alternativa para aumentar os requisitos de QoS, e ao mesmo tempo mantendo um preço atraente no cenário das comunicações ópticas.

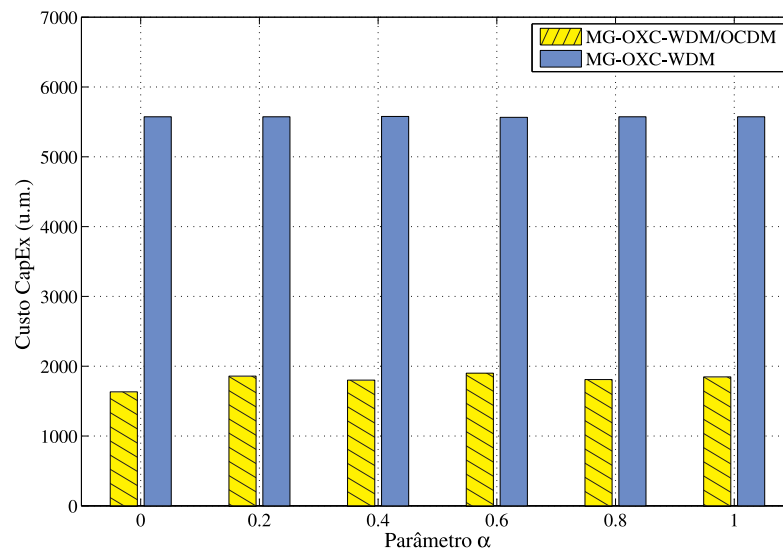


Figura 50: Comparativo de custos entre as tecnologias MG-OXC-WDM/OCDM e MG-OXC-WDM para a rede da Finlândia em função dos diferentes tipos de tráfego.

### 5.3.2 Custos da Rede NSFNET

A rede NSFNET será analisada neste tópico com o objetivo de verificar como o diâmetro de grandes redes influencia no custo das tecnologias utilizadas em sua implementação. O custo das tecnologias de comutação para esta rede, foi obtido da mesma maneira como já feito anteriormente. Entretanto, as rotas que possuem comprimento de mais de 1000 km, não podem utilizar os mesmos dispositivos que os utilizados pela rede da Finlândia devido a sua limitação de alcance. Assim, em rotas maiores de 1000 km, o transponder de 40 Gbps/2500 km bem

como o regenerador 40 G/2500 km devem ser considerados. De acordo com a tabela 6 o valor destes dispositivos são bem mais elevados do que os considerados na rede finlandesa, o que por consequência, eleva o custo total da rede.

Além disso, pode-se observar na figura 48 que algumas das rotas que constituem a rede NSFNET possuem mais de 2500 km de extensão, e como o alcance dos dispositivos não alcançam este *spam*, o cálculo deve ser feito considerando-se duas rotas, isso é, deve-se dobrar a quantidade de dispositivos utilizados por rota. Nas rotas menores que 1000 km, o custo é calculado do mesmo modo que na rede da Finlândia, utilizando o transponder com o custo de 1,00 u.m. A probabilidade de bloqueio de todas as rotas da rede também foi mantida em  $10^{-6}$  afim de testar as tecnologias sob as mesmas condições de funcionamento, e levantando seus respectivos custos sob condições iguais de teste.

Desse modo, na figura 51, apresentam-se os custos do MG-OXC-WDM/OCDM e também da rede caso ela fosse composta pela tecnologia SOA em função da variação do percentual de tráfego lento e rápido da rede.

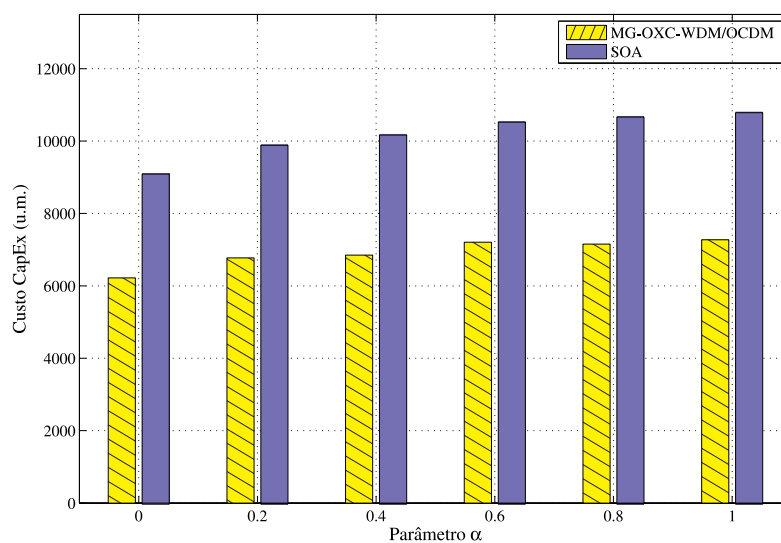


Figura 51: Custos das tecnologias MG-OXC-WDM/OCDM e SOA para a rede NSFNET em função dos diferentes tipos de tráfego.

De acordo com a figura, pode-se observar que comparada a tecnologia SOA, o MG-OXC-WDM/OCDM proposto ainda apresenta-se como boa alternativa, porém percebe-se que a mesma diferença de custos para rede da Finlândia foi muito maior, atingindo percentuais de diferença da ordem de 32 % até 37 %. Isso se justifica porque em maiores distâncias, aumenta-se o custo de implementação da tecnologia OCDM e também da tecnologia MEMS. A tecnologia SOA, também tem seus custos aumentados, entretanto o incremento nos custos das duas tecnologias já citadas é mais rápido em função da distância quando se considera a tecnologia

SOA.

Para verificar a viabilidade de implementação do MG-OXC-WDM/OCDM em comparação ao MG-OXC-WDM encontrado na literatura, é exibido na figura 55 o custo de ambos os dispositivos para a rede NSFNET.

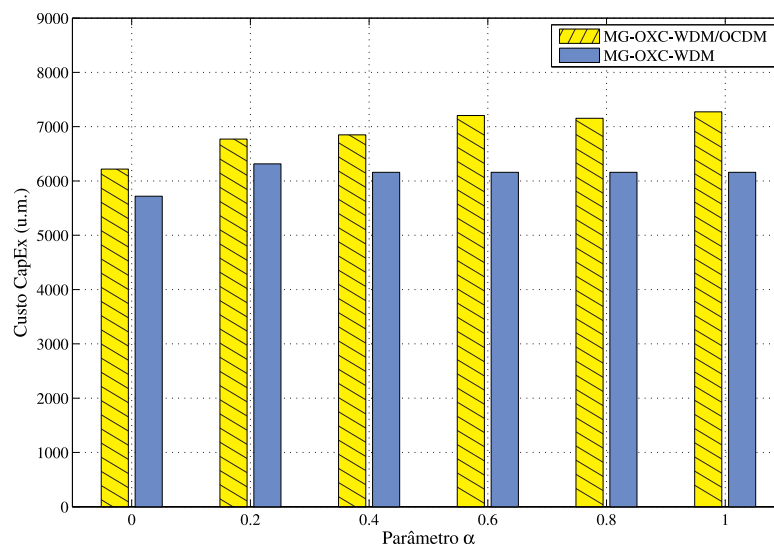


Figura 52: Comparativo de custos entre as tecnologias MG-OXC-WDM/OCDM e MG-OXC-WDM para a rede NSFNET em função dos diferentes tipos de tráfego.

A figura mostra que a aplicação da tecnologia híbrida WDM/OCDM em redes de longo alcance possui um custo maior quando comparada a tecnologia WDM. Isso ocorre não apenas porque os custos com os cabos de fibras aumentam, mas também porque em longas distâncias devem-se aumentar a capacidade dos transponders, bem como a quantidade de dispositivos para regeneração e condicionamento dos sinais a serem transmitidos. O aumento de custos em cada uma das tecnologias envolvidas, eleva conseqüentemente o custo final dos MG-OXCs, e, uma vez observado que o custo da tecnologia MEMS e da OCDM aumentam mais rápido do que a SOA em função do tráfego, justifica-se o fato da tecnologia proposta nesse trabalho ser mais cara do que a encontrada na literatura nos casos de redes com rotas ópticas superiores a 1000 km. Esta análise mostra que a tecnologia de MG-OXC-WDM/OCDM pelo menos por enquanto, não é economicamente viável em todas as situações, sendo mais indicada para redes locais e metropolitanas, ao passo que a já consolidada tecnologia WDM apresenta resultados satisfatórios quando testada em redes de longo alcance.

#### 5.4 ANÁLISE DO CONSUMO DE POTÊNCIA DOS NÓS MG-OXC

Os resultados desta seção, tem o objetivo de mostrar o consumo de potência de um nó da rede óptica, segundo o modelo de consumo dado em 4.12. Estes resultados foram obtidos

utilizando os dados de consumo informados na tabela 5, e também o número de comprimentos de onda utilizados na tabela 8. De modo a fazer um comparativo entre as tecnologias estudadas nesse trabalho, são ilustradas as potências em um nó da rede utilizando o MG-OXC-WDM, o MG-OXC-WDM/OCDM, e também um OXC composto apenas pela tecnologia SOA. São ilustradas abaixo, as potências dos três dispositivos em função do percentual de tráfego lento e rápido da rede, admitindo-se uma probabilidade de bloqueio de  $10^{-6}$ . Nessa figura, considerou-se uma taxa de transmissão de 10 Gbps.

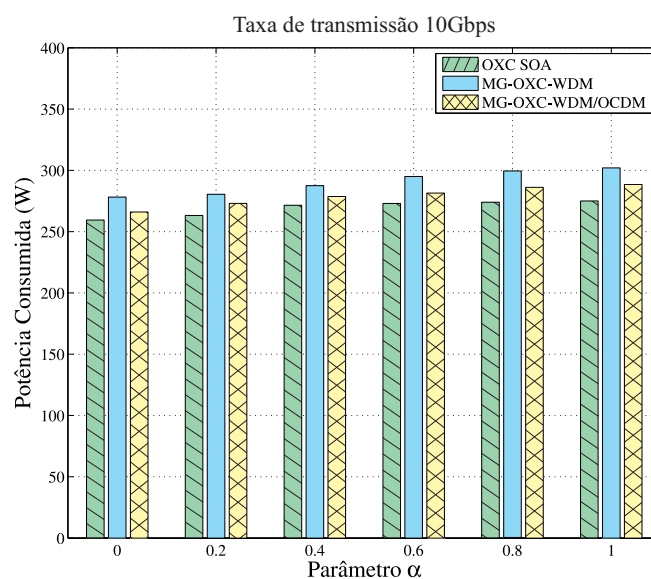


Figura 53: Consumo de potência entre as tecnologias para taxa de transmissão de 10Gbps.

A seguir, é ilustrado o consumo para uma taxa de transmissão de 40 Gbps.

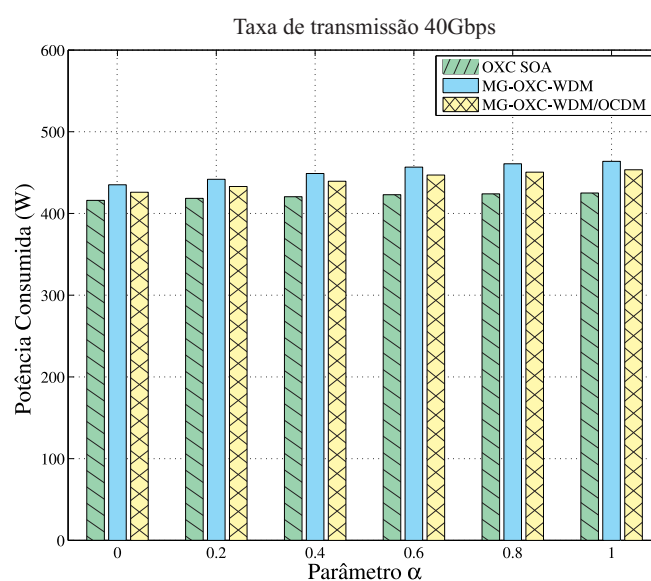


Figura 54: Consumo de potência entre as tecnologias para taxa de transmissão de 40Gbps.

Na terceira figura ilustrada abaixo, é dado o consumo de potência considerando-se

uma taxa de transmissão de 100 Gbps.

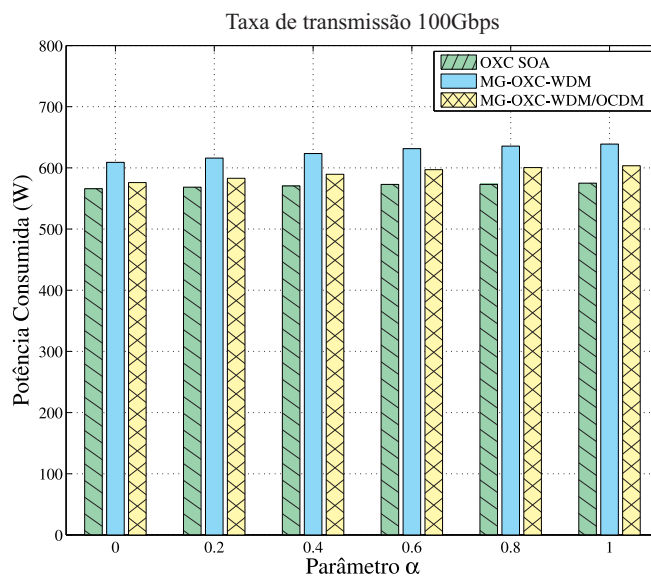


Figura 55: Consumo de potência entre as tecnologias para taxa de transmissão de 100Gbps.

Observando as três figuras apresentadas, é possível verificar que a taxa de transmissão é um fator determinante para o consumo. Verifica-se pela tabela 5, que a potência dos transponders e dos regeneradores aumenta a medida que se necessita de uma taxa de transmissão maior, o que justifica o crescimento das potências na sequência das figuras. Outro fator que pode alterar estes valores de consumo, é a quantidade de comprimentos de onda utilizados, pois a potência de cada tecnologia de comutação estudada ( $P_{sw}$ ) é calculada por porta utilizada.

De modo a salientar estas evidências, a figura 56 mostra como a potência varia em função da taxa de transmissão, considerando diferentes percentuais de tráfego. Como o modelo de consumo de potência dado pela equação 4.12 é um modelo linear, não se observam diferenças significativas entre as três figuras. Isso acontece porque as diferenças nos valores das potências em cada figura, são devido ao apenas ao diferente número de comprimentos de onda que são necessários a se manter a probabilidade de bloqueio utilizada. De qualquer modo, os gráficos conseguem evidenciar de forma nítida, como a potência aumenta a medida que se aumenta a taxa de transmissão. Para o parâmetro  $\alpha = 0,5$  (figura 56 - b) foram utilizados 19 comprimentos de onda na partição lenta e 4 na partição rápida.

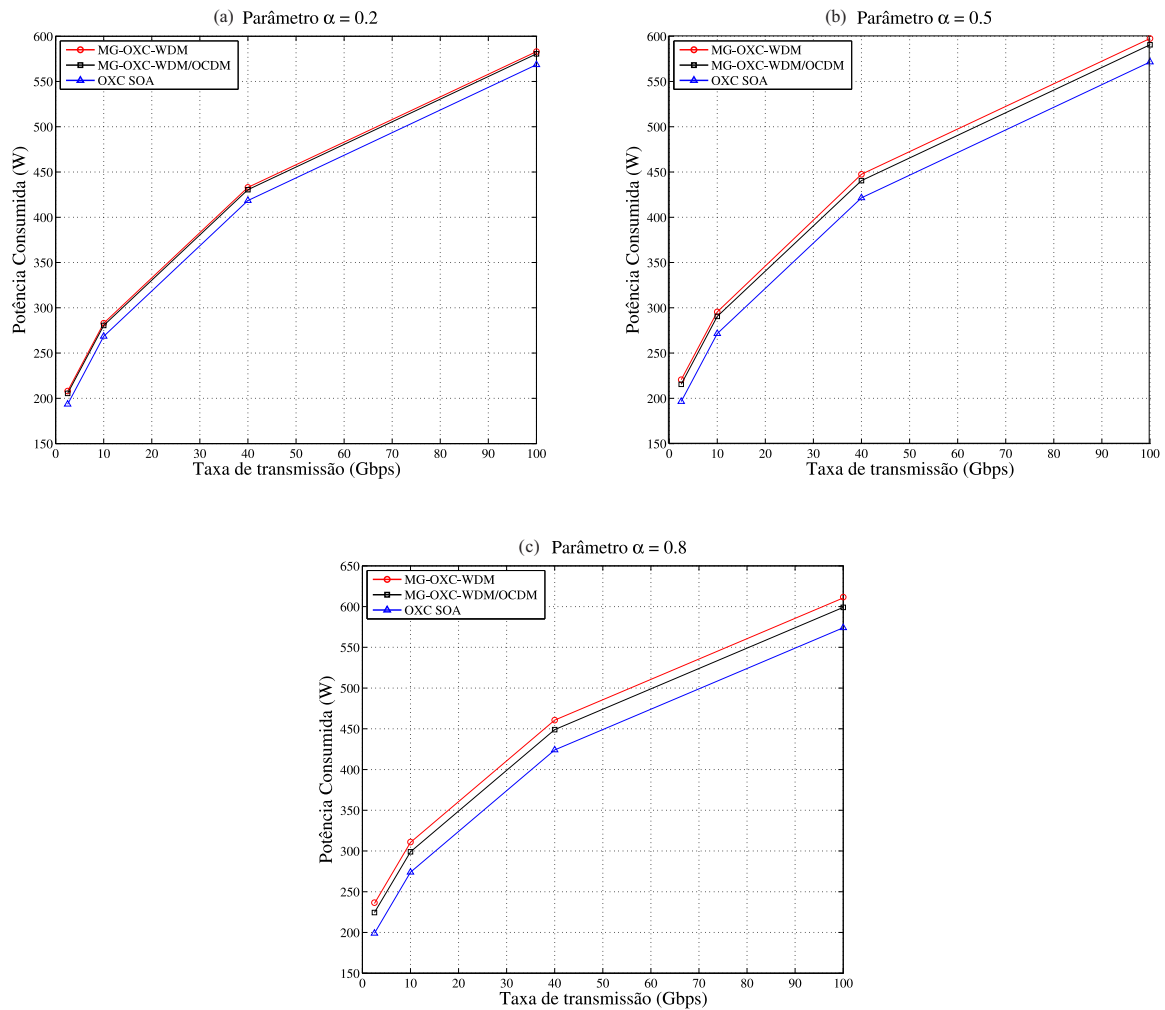


Figura 56: Variação do consumo de potência em função da taxa de transmissão.

## 5.5 OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE POTÊNCIA DA REDE

Para todas as simulações, os valores típicos dos parâmetros da potência de ruídos em amplificadores ópticos foram adotados [97]. Desse modo, foram adotados  $n_{sp} = 2$ ,  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  (J/Hz),  $f = 193,1$  (THz),  $G = 20$  (dB) e  $B_0 = 100$  (GHz). Foram incluídas no modelo de otimização, perdas para o codificador/decodificador baseadas em grades de Bragg de 2 (dB) e perdas no roteador de 20 (dB). Foram adotados códigos de peso 4 e comprimento 101, que são caracterizados por  $(4 \times 101, 4, 1, 0)$ , e meta de SNIR  $\gamma_i^* = 20$  dB.

É bem conhecido na literatura que o desempenho do PSO para resolução de problemas de alocação de recursos, é altamente dependente de seus parâmetros de controle. Neste contexto, foram adotados os parâmetros utilizados em [97]. Em pesquisas sobre o problema de alocação de potência em redes, vários parâmetros dependem do número de usuários simultâneos transmitindo, principalmente os coeficientes de aceleração  $C_1$  e  $C_2$ . No caso de

uma rede real WDM/OCDM, o número de usuários que transmitem simultaneamente, gira em torno de 10, podendo até ser menor. Trabalhos anteriores mostraram que a melhor convergência *versus* solução foram obtidas utilizando-se  $C_1 = 1,8$  e  $C_2 = 2$  para um número de códigos menor que 10. O parâmetro  $\rho$  na função A.3, foi definido como função do número de usuários, de modo que  $\rho = K \times 10^{-19}$ , o tamanho da população foi definida como  $\mathcal{P} = K + 2$ . O melhor desempenho/complexidade foi obtido definindo o máximo fator de velocidade como  $V_{max} = 0,2(P_{max} - P_{min})$ . A máxima velocidade fina e inicial foi delimitada através do peso da inércia inicial e final, multiplicado por  $V_{max}$ , adotado como diferença percentual máxima e mínima dos valores de potência,  $\omega_{initial} \cdot V_{max} = 0,2(P_{max} - P_{min})$ ,  $\omega_{final} \cdot V_{max} = 0,002(P_{max} - P_{min})$  e  $\mathcal{G} = 800$  iterações.

Foram adotadas taxas de transmissão de 10, 40 e 100 Gbps para calcular o consumo de potência da rede. Os fatores  $\eta_c$  e  $\eta_{pr}$  foram assumidos como 2. A eficiência do OXC ( $PE_{OXC}$ ) pode ser determinada por meio da equação [1]:

$$PE_{OXC} = \frac{P_{OXC}}{C_{OXC}} = \frac{(150[W] + N \cdot (85[W] + 50[W]))}{40 \cdot T[Gbps] \cdot N} \quad (5.1)$$

onde  $C_{OXC}$  representa a capacidade do OXC e  $T$  a taxa de transmissão. Os valores adotados para as taxas utilizadas foram: em 10 Gbps,  $PE_{OXC} = 0,46W/Gbps$ , para a taxa de 40 Gbps,  $PE_{OXC} = 0,11W/Gbps$ , e para a taxa de 100 Gbps,  $PE_{OXC} = 0,05W/Gbps$ . Estes valores foram calculados considerando-se um OXC de 40 canais e grau 3.

A eficiência energética do transponder ( $PE_{TR}$ ) pode ser obtida pela simples divisão entre a potência do dispositivo, e sua capacidade ( $C_{TR}$ ). Nas simulações foram utilizados os valores de 5 W/Gbps, 2,5 Gbps e 1,5 Gbps para as taxas de transmissão de 10, 40 e 100 Gbps respectivamente. A eficiência energética dos amplificadores ( $PE_{OLA}$ ) foram assumidas como 0,27 W/ Gbps, 0,16 W/Gbps e 0,03 W/Gbps para as mesmas respectivas taxas. Do mesmo modo, para a eficiência dos regeneradores, assumiram-se os valores de 10 W/Gbps, 8,2 W/Gbps e 3W/Gbps [1].

A contagem média de saltos em uma rede uniforme, pode ser aproximada pela seguinte equação, no qual  $W$  é o número de nós da rede e  $L$  o número de *links* bidirecionais.

$$H = \sqrt{\frac{W - 2}{\frac{2L}{W} - 1}} \quad (5.2)$$

Como já mencionado, este trabalho investiga duas redes ópticas, a rede da Finlândia, e a rede NSFNET. A primeira é composta por 12 nós e 19 *links* bidirecionais, possuindo um fator  $H$  de 1,46. Já a rede NSFNET, possui 14 nós e 21 *links* bidirecionais, e desse modo com

fator  $H$  igual a 6. Como já citado, o valor de  $\alpha$  para a rede finlandesa é 132,3 km, e para a rede americana é 1083 km. Foram considerados  $L_{amp} = 80$  km e  $L_{regen} = 1500$  km.

A Figura 57, mostra o consumo total de potência em função do fator de convergência para a otimização com o PSO, e também para o modelo de consumo proposto em [1]. Nesta figura, encontram-se 3 demandas diferentes de de tráfego: 10 Gbps (Figura 57 - a), 40 Gbps (Figura 57 - b) e 100 Gbps (Figura 57 - c). Do mesmo modo que em simulações anteriores, os três modelos de OXC foram utilizados, afim de se estabelecer comparativos.

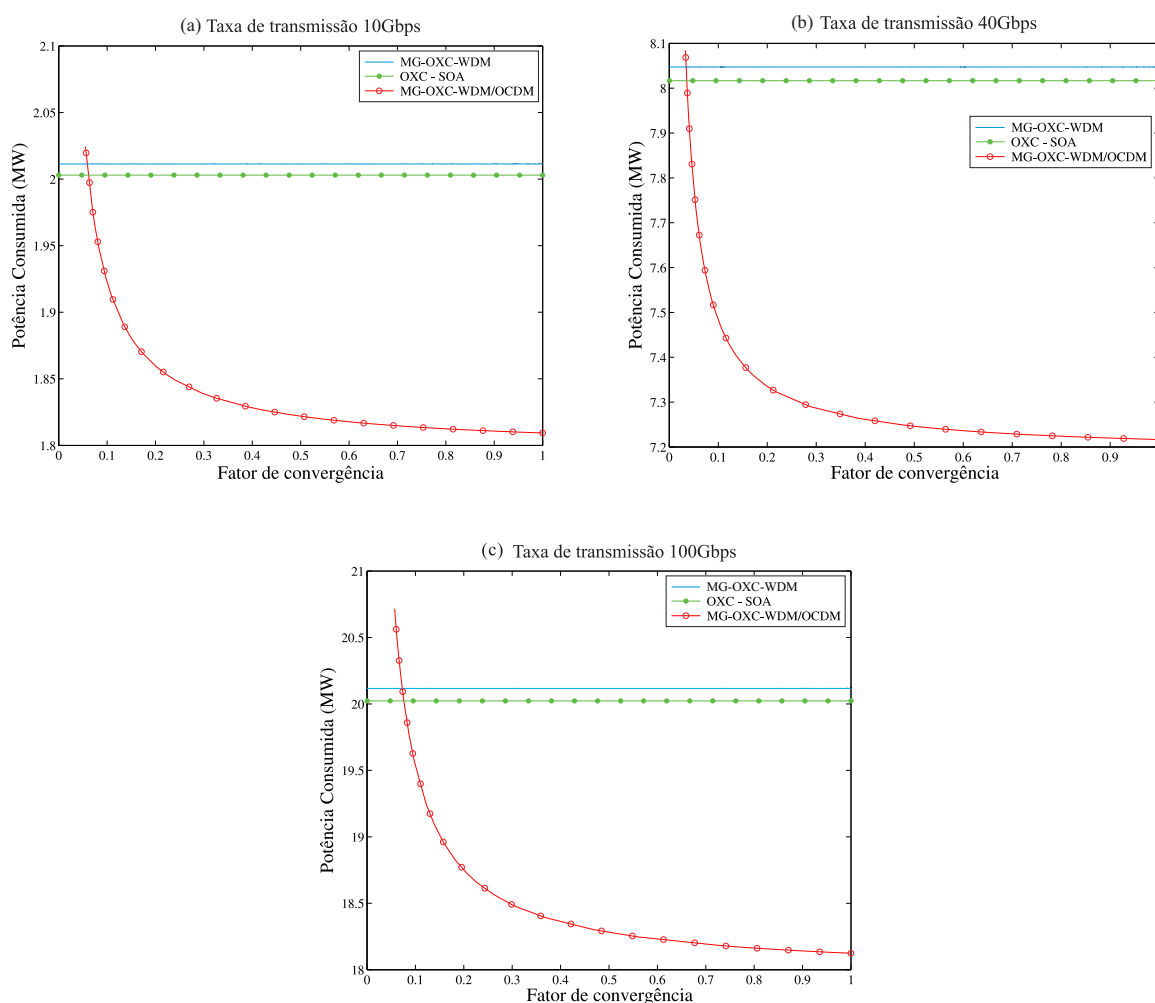


Figura 57: Potência total consumida pela rede da Finlândia em função do fator de convergência utilizando o algoritmo PSO e o modelo de consumo de [1].

Pode ser observado por meio desta figura, o impacto da utilização do algoritmo PSO em termos de melhoria do consumo de potência. Como já observado na análise de consumo de apenas um nó da rede, a potência do MG-OXC-WDM permaneceu maior, uma vez que a potência dos espelhos MEMS é maior do que a da tecnologia SOA. A implantação do PSO com um fator de convergência de 100% resulta em uma variação de potência de aproximadamente 10% para a taxa de transmissão de 10 Gbps e aproximadamente 12% para as taxas de 40 e 100

Gbps, quando comparadas com o modelo desenvolvido em [1], sem política de otimização de energia. Nas ilustrações, é possível perceber que com um número muito baixo de iterações do PSO, o fator de convergência tornou-se muito baixo ( $< 0,08$ ), o que mantém o consumo de potência com valores muito próximos aos obtidos no modelo sem otimização de consumo e de SNIR, bem como a variação com um número maior de iterações do algoritmo. A otimização da SNIR, diminui a interferência de caminhos ópticos.

A seguir, ilustra-se na figura 59 os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo PSO para a rede NSFNET. Do mesmo modo que na rede da Finlândia, a figura mostra o consumo de total de potência da rede em função do fator de convergência.

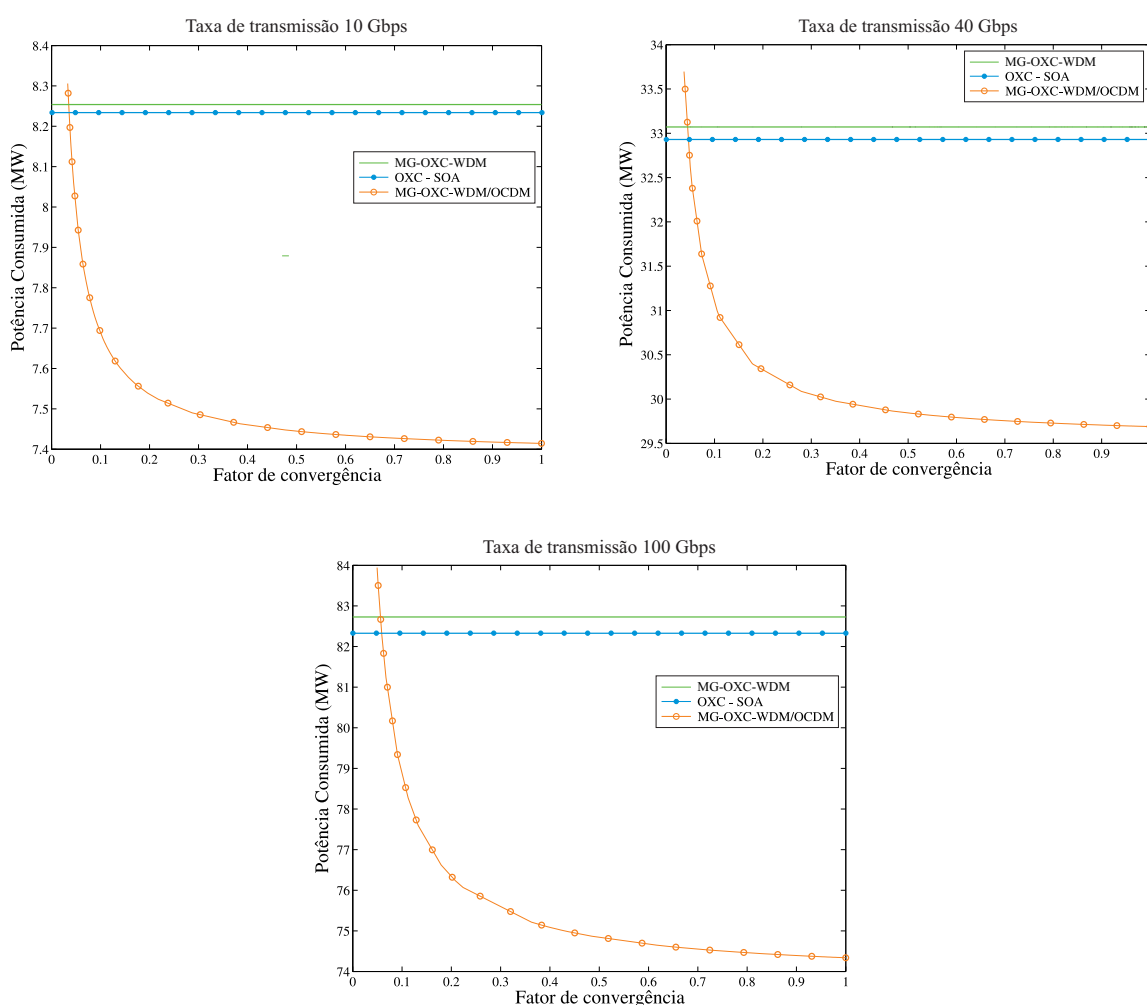


Figura 58: Potência total consumida pela rede NSFNET em função do fator de convergência utilizando o algoritmo PSO e o modelo de consumo de [1].

Do mesmo modo que o observado na simulação anterior, observa-se que pelos mesmos motivos a potência consumida pelo MG-OXC-WDM foi maior quando comparada ao OXC composto pela tecnologia SOA e ao MG-OXC-WDM/OCDM proposto. Pode-se verificar que a implementação do PSO com fator de convergência de 100% resultou em uma economia de

aproximadamente 11 % em todas as taxas de transmissão investigadas. Estes resultados mostram que o MG-OXC-WDM/OCDM proposto neste trabalho, apresenta-se como boa alternativa às redes ópticas, tanto no cenário de economia de custos, como de energia elétrica.

## 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

### 6.1 CONCLUSÕES

Este estudo mostrou que uma rede com comutação óptica multi-granular, pode suportar de forma dinâmica os comprimentos e sub-comprimentos de onda das granularidades de sua largura de banda, com diferentes níveis de QoS, e para isso, a rede deve suportar as três tecnologias básicas de comutação em redes WDM: a OCS, a OPS e a OBS. Neste contexto, este trabalho apresentou uma arquitetura multi-granular de comutação baseada na tecnologia híbrida (WDM/OCDM) denominada MG-OXC-WDM/OCDM. Nesta arquitetura o tráfego de pacotes de longa duração é comutado por chaves lentas do tipo (*Micro Electro-Mechanical System*) MEMs e os pacotes de curta duração serão comutados por comutadores OCDM.

Nesta investigação dos custos, foi efetuada a análise de desempenho das tecnologias de comutação MEMS, SOA e do roteador OCDM, com o objetivo de se investigar suas características e comportamento, mediante fatores como velocidade de comutação e tamanho dos pacotes de dados. Após isso, foi feito um estudo comparativo de custos de implementação das tecnologias estudadas. Além do estudo de custos de implementação, este trabalho também investigou o consumo de potência do MG-OXC-WDM/OCDM, do MG-OXC-WDM encontrado na literatura, e também de um OXC composto totalmente pela tecnologia SOA. Após isso, foi efetuada a otimização de potência do MG-OXC-WDM/OCDM utilizando o algoritmo PSO nas mesmas redes utilizadas anteriormente. De acordo com os resultados obtidos, as seguintes situações puderam ser concluídas:

- A utilização da rede é baixa quando se empregam pacotes de dados de pequeno comprimento em conjunto com a comutação lenta. Isto acontece porque o tempo de comutação das chaves MEMS possui aproximadamente o mesmo tamanho dos pacotes, podendo ser até maior. Entretanto, a utilização de comutadores rápidos do tipo SOA, maximiza a utilização da rede pois libera-se o tempo necessário para os nós comutarem outros pacotes;
- A probabilidade de descarte dos dados, é influenciada pelo tamanho das rajadas a serem transmitidas. Foi possível observar que esta probabilidade de perdas é menor quando quando se emprega a tecnologia de comutação rápida, comparada a tecnologia lenta. E isto torna-se mais evidente, nos casos em que as rajadas possuem tamanho reduzido. Assim, se observa que para rajadas de pequeno comprimento, a probabilidade de perda destas, é sensivelmente menor quando comparada com os valores obtidos para a comutação

lenta;

- O custo de implementação de um OXC totalmente composto pela tecnologia SOA, é maior quando comparado ao custo do MG-OXC-WDM/OCDM. Os resultados mostraram que o MG-OXC proposto, apresenta uma redução de custos que pode variar de 51% até 57% para os valores testados, quando comparados aos custos gerados pelos comutadores ópticos SOA;
- Os resultados baseados no modelo de custo baseados em CapEx, ilustram que o MG-OXC-WDM/OCDM proposto, pode apresentar o mesmo desempenho que o MG-OXC-WDM proposto na literatura, porém com uma economia de custo média que varia entre 21% e 36 % em função da variação de tráfego da rede.
- Quando aplicado em uma rede de pequeno diâmetro como a da Finlândia por exemplo, o MG-OXC-WDM/OCDM apresentou uma economia de custo em torno de 65% em relação ao MG-OXC-WDM, e de até 72% em relação a um OXC de tecnologia SOA, e quando aplicado em uma rede de grande diâmetro como a NSFNET por exemplo, o MG-OXC-WDM/OCDM não mostrou-se como melhor alternativa. Obteve-se uma redução que variou em torno de 32% até 38% em relação a tecnologia SOA. Entretanto, seu custo superou o do MG-OXC-WDM, em torno 5% até 15%.
- No que diz respeito ao consumo de potência da rede, verificou-se que o MG-OXC-WDM é o dispositivo testado que possui o maior consumo, estando a frente do MG-OXC-WDM/OCDM e em seguida, do OXC com tecnologia SOA. Isso ocorre porque o consumo de potência por porta das chaves MEMS é maior que as chaves WSS e também as do tipo SOA.
- Por meio da figura 56, foi possível comprovar que do mesmo modo que o descrito na literatura, o consumo de potência depende fortemente da taxa de transmissão, sendo maior o consumo, a medida que se aumenta a taxa.
- Os resultados obtidos para a otimização da rede empregando o algoritmo PSO, permitem concluir que o MG-OXC-WDM/OCDM proposto, pode ter seu consumo reduzido de 10% até 12% dependendo da taxa de transmissão, tanto em redes ópticas de grande alcance, como nas de menor alcance.

Em função dos resultados apresentados nesta dissertação, verifica-se que a utilização dos OXCs multi-granulares nas redes ópticas, aumenta o desempenho destas redes por meio da diminuição da probabilidade de perdas de pacotes, e da latência, promovendo aumento

da utilização da rede. Também, verifica-se que a tecnologia OCDM pode ser empregada em conjunto com a tecnologia WDM para a obtenção de redes ópticas que possam comportar o aumento constante de tráfego de forma flexível e eficiente reduzindo custos e gastos de energia.

## 6.2 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O modelo de alocação de tráfego utilizado neste trabalho, leva em consideração que a taxa de chegada dos pacotes e seus respectivos tamanhos, seguem uma distribuição exponencial. Desse modo, para controlar e avaliar a influência dos diferentes tipos de tráfego utilizou-se no algoritmo de desempenho uma função densidade de probabilidade, onde se informava manualmente o percentual de tráfego. Assim, uma melhoria a ser implementada na análise do desempenho, é o desenvolvimento de um algoritmo de geração de tráfego mais próximo dos modelos reais utilizados nas redes, o que resultará em valores mais aprimorados sobre a quantidade de recursos a ser instalada na rede.

Além do levantamento de custos do MG-OXC-WDM/OCDM proposto e sua análise de desempenho, esse trabalho investigou o seu consumo de potência, bem como o de outras duas tecnologias de OXCs: o MG-OXC-WDM e um OXC composto pela tecnologia SOA. Além deste estudo, o consumo de potência do dispositivo proposto foi otimizado por meio do algoritmo PSO, dentro do cenário de duas redes ópticas distintas. Entretanto, esta otimização testou apenas este algoritmo no processo de simulação. Pretende-se fazer a continuação da otimização aqui estudada testando outras formas de otimização, como a utilização de outros algoritmos e teoria de jogos.

O cenário de simulação adotado foi um denominado não-*bypass*, no qual todo o tráfego desde sua origem até seu destino, é processado em todos os roteadores da rota. Foi encontrado na literatura um cenário de simulação utilizando um *bypass* óptico para o cálculo de consumo da rede. Um cenário de *bypass* óptico é caracterizado pelo estabelecimento de um túnel *wave-band* dedicado, do nó de origem ao nó de destino. Ao se fazer isso, é criada uma nova e modificada topologia chamada de topologia virtual. Desta forma, o tráfego de dados destinado a um nó que não seja de interesse, não precisa ser tratado pelo roteador, e conseqüentemente, não precisa ser decodificado e codificado novamente. Não existindo a conversão O-E-O, o consumo de potência da rede é reduzido. A figura 59 abaixo ilustra essa arquitetura.

Os resultados dessa pesquisa mostraram que o cenário de simulação utilizando a técnica do *bypass* óptico proporcionou uma economia de até 15% em relação a um modelo convencional sem a técnica. Nesse contexto, pretende-se estudar e identificar as características e parâmetros de simulação utilizados em [1], de modo que sirvam como referência para que

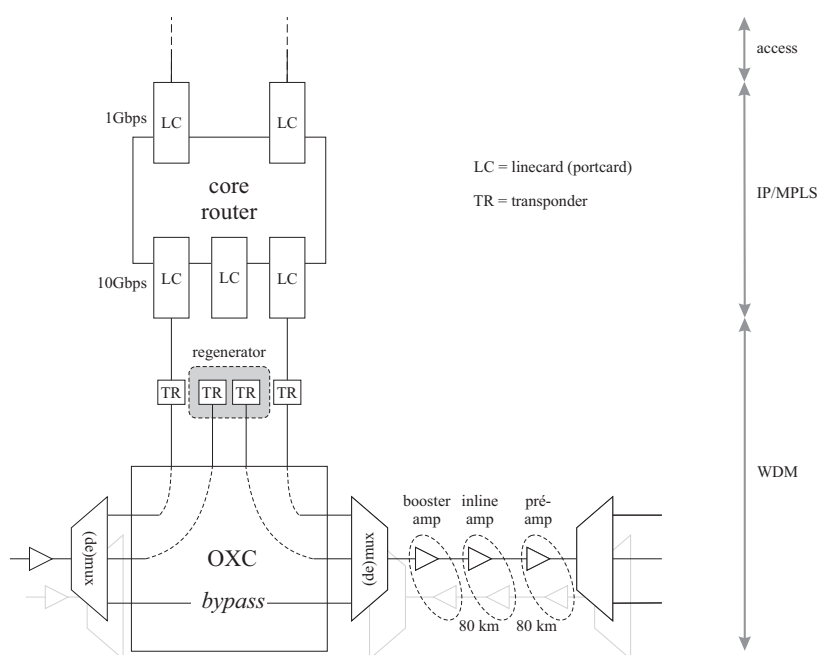


Figura 59: Arquitetura do nó e roteador estudado em [1]

sejam aplicados no MG-OXC-WDM/OCDM. A intenção é que, aliando-se a técnica de *bypass* óptico ao processo de otimização feito com o PSO, o OXC proposto nesse trabalho tenha seu consumo de potência ainda mais otimizado.

## ***APÊNDICE A - APLICAÇÃO DO PSO PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA***

Neste trabalho, o PSO é aplicado para determinar a potência transmitida e a eficiência de energia otimizado ( $PE_{TR}^{OP}$ ). Aqui, o modelo adotado de SNIR considera a interferência de múltiplo acesso (MAI) entre os caminhos ópticos baseados em códigos 2-D e emissão espontânea amplificada (ASE) em *spans* amplificados em cascata [98], [97]. Além disso, o ruído acumulado nos amplificadores em cascata no percurso óptico foi calculado usando o mesmo modelo descrito em [98].

O algoritmo PSO é baseado no comportamento de grupos sociais como bandos de aves, tendo como princípio de funcionamento o seguinte cenário: um grupo de pássaros procurando aleatoriamente por comida em uma região próxima. Existe apenas uma fonte de comida na área onde está sendo efetuada a busca, e nenhum pássaro sabe onde a comida está, mas eles sabem o quão longe está a comida a cada iteração de tempo (considerando um tempo discreto). Logo, a melhor estratégia para encontrar a comida é seguir o pássaro que está mais próximo a ela.

O algoritmo PSO tenta imitar este cenário e utilizá-lo para resolver problemas de otimização. Neste método, cada solução separada corresponde a um pássaro no espaço de busca. No PSO, o equivalente ao pássaro é chamado de partícula. Todas as partículas possuem resultados (*fitness*) que são verificados utilizando a função objetivo, e possuem velocidades que direcionam o vôo das partículas. As partículas voam no espaço do problema seguindo as partículas que possuem a solução ótima atual.

O algoritmo é inicializado com um grupo de partículas aleatórias (soluções) e então procuram pela solução ótima melhorando suas gerações. Em cada iteração, cada partícula é melhorada seguindo dois “melhores” valores. O primeiro é o melhor resultado que esta partícula encontrou anteriormente. O outro valor, que é seguido pela partícula, é o melhor valor obtido

por qualquer outra partícula da população. Depois de encontrar os dois melhores valores, a partícula atualiza sua velocidade e posição em que denota-se  $b_p$  como as coordenadas da partícula e  $v_p$  a correspondente velocidade de vôo no espaço do problema. Nesta estratégia, cada candidato vetor-potência  $\mathbf{b}_p[t]$ , com dimensão  $K \times 1$ , onde  $K$  é o número de caminhos ópticos, é utilizado para calcular o vetor-velocidade da próxima iteração [97] de acordo com a equação:

$$\mathbf{v}_p[t + 1] = \omega[t] \cdot \mathbf{v}_p[t] + C_1 \cdot \mathbf{U}_{p1}[t](\mathbf{b}_p^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t]) + C_2 \cdot \mathbf{U}_{p2}[t](\mathbf{b}_g^{best}[t] - \mathbf{b}_p[t]) \quad (\text{A.1})$$

onde  $w[t]$  é chamado de peso da inércia da velocidade anterior, para o cálculo da velocidade atual, o vetor velocidade possui dimensão  $K$ , ou seja  $\mathbf{v}_p[t] = [v_{p1}^t, v_{p2}^t, \dots, v_{pK}^t]^T$ ; as matrizes diagonais  $\mathbf{U}_{p1}[t]$  e  $\mathbf{U}_{p2}[t]$  são de dimensão  $K$ , e tem variáveis randômicas como elementos possuindo distribuição uniforme  $\sim U \in [0, 1]$  geradas pela  $p$ ésima partícula na interação  $t = 1, 2, \dots, \mathcal{G}$ ;  $\mathbf{b}_g^{best}[t]$  e  $\mathbf{b}_p^{best}[t]$  são respectivamente os melhores vetores posição global e local encontrados até a  $t$ ésima iteração;  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes de aceleração sobre as melhores partículas e as melhores posições globais na velocidade de atualização, respectivamente. A  $p$ ésima posição da partícula na  $t$ ésima iteração é definida pela potência do vetor candidato  $\mathbf{b}_p[t] = [b_{p1}^t, b_{p2}^t, \dots, b_{pK}^t]^T$ . A posição de cada partícula é atualizada usando o novo vetor velocidade para cada partícula,

$$\mathbf{b}_p[t + 1] = \mathbf{b}_p[t] + \mathbf{v}_p[t + 1], \quad p = 1, \dots, \mathcal{P} \quad (\text{A.2})$$

onde  $\mathcal{P}$  é o tamanho da população. A seguinte função de maximização de custos pode ser empregada como uma alternativa para a otimização de alocação de recursos [97].

$$j_1(\mathbf{p}) = \max \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathcal{F}_k^{th} \left( 1 - \frac{p_k}{P_{\max}} \right) + \frac{\rho}{\sigma_{rp}} \quad (\text{A.3})$$

$$\gamma_k \geq \gamma_k^*, 0 < p_k^l \leq P_{\max}, \quad R^l = R_{\min}^l \forall k \in K_l \quad e \quad \forall l = 1, 2, \dots, L$$

onde  $L$  é o número de diferentes grupos de taxas de informação permitidas no sistema, e  $K_l$  é o número de usuários no  $l$ ésimo grupo de taxas com taxa mínima, que é dado por  $R_{\min}^l$ . O termo  $\frac{\rho}{\sigma_{rp}}$  possui influência efetiva na minimização do efeito *near-far* em sistemas WDM/OCDM, e ao mesmo tempo possui um valor não nulo para todas as partículas do enxame (*swarm*).  $\mathcal{F}_k^{th}$  é a função de limiar definida em [97]. O termo  $1 - \frac{p_k}{P_{\max}}$  prioriza as soluções com mínimo de energia e descarta as que utilizam níveis mais altos.

O algoritmo PSO consiste em se fazer a aplicação repetida da velocidade de atuali-



## Referências

- [1] W. V. Heddeghem, F. Idzikowski, W. Vereecken, D. Colle, M. Pickavet, and P. Demeester, “Power consumption modeling in optical multilayer networks,” Photonic Network Communications, 2012.
- [2] S. Bregni, “A historical perspective on telecommunications network synchronization,” IEEE Communications Magazine, vol. 36, no. 6, pp. 158–166, 1998.
- [3] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, Optical Networks: A Practical Perspective. San Mateo, USA: Morgan Kaufmann, 2002.
- [4] A. Stok and E. Sargent, “Lighting the local area: Optical code-division multiple access and quality of service provisioning,” IEEE Network, pp. 42–46, Dezembro 2000.
- [5] K. Kitayama, H. Sotobayashi, and N. Wada, “Optical code division multiplexing (ocdm) and its applications to photonic networks,” IEICE Transactions Fundamentals, vol. E82, no. 12, pp. 2616–2626, Dezembro 1999.
- [6] K. Fouli and M. Maier, “Ocdma and optical coding: Principles, applications, and challenges,” IEEE Communications Magazine, vol. 45, no. 8, pp. 27–34, Agosto 2007.
- [7] H. Yin and D. J. Richardson, Optical code division multiple access communication networks: theory and applications. Springer-Verlag and Tsinghua University Press, 2009.
- [8] F. R. Durand and T. Abrão, “Alocação de potência em redes Ópticas cdma multitaxas com códigos Ópticos bidimensionais utilizando o equilíbrio de verhulst,” XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2011.
- [9] M. de Leenher, C. Davelder, J. Buysse, B. Dhoedt, and P. Demeester, “Performance analysis and dimensioning of multi-granular optical network,” Optical Switching and Network, pp. 88–98, Março 2009.
- [10] R. Huelsermann, M. Gunkeles, C. Meusburger, and D. A. Schupke, “Cost modeling and evaluation of capital expenditures in optical multilayer networks,” Journal of Optical Networking, vol. 7, no. 9, pp. 814–833, Setembro 2008.
- [11] F. R. Durand, “Contribuições ao estudo de redes ópticas híbridas wdm/ocdm,” Ph.D. dissertation, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Dezembro 2007.
- [12] F. R. Durand, M. S. Filho, and T. Abrão, “The effects of power control on the optical cdma random access protocol,” Optical Switching and Network, 2011.
- [13] N. Tarhuni, T. Korhonen, M. Elmusrati, and E. Mutafungwa, “Power control of optical cdma star networks,” Optics Communications, vol. 259, pp. 655–664, Março 2006.
- [14] E. Inaty, R. Raad, P. Fortier, and H. M. H. Shalaby, “A fair qos-based resource allocation scheme for a time-slotted optical ov-cdma packet networks: a unified approach,” Journal Lightwave Technology, vol. 26, no. 21, pp. 1–10, Janeiro 2009.

- [15] saw Khaleghi and M. R. Pakravan, "Quality of service provisioning in optical cdma packet networks," Journal of Optical Communications Networking, vol. 2, no. 5, pp. 283–292, Fevereiro 2010.
- [16] E. Inaty, H. S. P. Fortie, and L. Rusch, "Optical fast frequency hopping cdma system using power control," Journal of Lightwave Technology, vol. 20, no. 2, pp. 166–177, Março 2003.
- [17] C. C. Yang, J. F. Huang, and T. C. Hsu, "Differentiated service provision in optical cdma network using power control," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 20, no. 20, pp. 1664–1666, 2008.
- [18] H. Yashima and T. Kobayashi, "Optical cdma with time hopping and power control for multirate networks," Journal Lightwave Technology, vol. 2, no. 5, pp. 283–292, 2003.
- [19] R. Raadand, E. Inatyand, P. Fortier, and H. M. H. Shalaby, "Optimal resource allocation scheme in a multirate overlapped optical cdma system." Journal Lightwave Technology, vol. 25, no. 8, pp. 2044–2053, 2007.
- [20] M. Tang, C. Long, and X. Guan, "Optimization for power control in wireless cdma networks," Wireless Personal Communications, vol. 58, no. 4, pp. 851–865, 2011.
- [21] H. Elkamchouchi, H. Elragal, and M. Makar, "Power control in cdma system using particle swarm optimization," in 24th National Radio Science Conference, 2007, pp. 1–8.
- [22] E. Mutafungwa, "Comparative analysis of the traffic performance of fiber-impairment limited wdm and hybrid ocdm/wdm networks," Photonic Network Communications, vol. 13, pp. 53–66, 2007.
- [23] C. S. Brès and P. R. Prucnal., "Code-empowered lightwave networks," Journal Lightwave Technology, vol. 25, no. 10, pp. 2911–2921, Outubro 2007.
- [24] F. R. Durand and T. Abrão, "Alocação de potência em redes ópticas cdma multitaxas com códigos ópticos bidimensionais utilizando o equilíbrio de verhulst." XXIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBrT'11, Outubro 2011.
- [25] G. S. Zervas, M. de Leenher, L. Sadeghioon, D. Klionidis, Y. Qin, R. Nejebati, D. Simeonidou, C. Develter, B. Dhoedt, and P. Demeester, "Multi-granular optical cross-connect: Design, analysis, and demonstration," Journal of Optical Community Networking, vol. 1, no. 1, pp. 69–84, Junho 2009.
- [26] X. Xiao, Technical, Commercial and Regulatory Challenges of QoS: An Internet Service Model Perspective. Morgan Kaufmann, 2008.
- [27] S. J. Yoo, "Optical packet and burst switching technologies for the future photonic internet," Journal Lightwave Technology, vol. 24, no. 12, pp. 4468–4492, Dezembro 2006.
- [28] G. ir Papadimitriou, C. Papazoglou, and A. S. Pomportsis, "Optical switching: Switch fabrics, techniques, and architectures," Journal Lightwave Technology, vol. 21, no. 2, Fevereiro 2003.
- [29] F. Rambach, B. Konrad, L. Dembeck, U. Gebhard, M. Gunkel, M. Quagliotti, L. Serra, and V. López., "A multilayer cost model for metro/core networks," Journal of Lightwave Technology, vol. 5, no. 3, pp. 814–833, Setembro 2013.

- [30] C. S. Brès, G. C. Yang, and P. Prucnal, “Demonstration of a transparent router for wavelength-hopping time-spreading optical ocdma,” Optics Communications, vol. 254, no. 1, pp. 58–66, 2005.
- [31] K. D. R. Assis, W. F. Giozza, and H. Waldman., “Redes ópticas estáticas para o tráfego ip.” FEEC - Decom - Universidade Estadual de Campinas, 1993.
- [32] R. Medina, “Photons vs. electrons (all optical network).” Journal of Magazine, IEEE., vol. 21, no. 2, Maio 2002.
- [33] W. F. Giozza, E. Conforti, and H. Waldman, Fibras Ópticas. Tecnologia e Projeto de Sistemas. São Paulo: Makron Books, 1991.
- [34] G. T. Laskoski, “Padrão sonet/sdh para sistemas ópticos,” Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Tech. Rep., Julho 2006.
- [35] D. K. Ass, “O suporte ao tráfego de internet pela rede óptica.” Master’s thesis, Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- [36] A. F. Herbster, “Extensão da faixa dinâmica de edfas por compensação da emissão espontânea amplificada no controle eletrônico de ganho,” Master’s thesis, Universidade Estadual de Campinas, Agosto 2010.
- [37] L. G. M. L. Genie, “Contribuição ao encaminhamento de comprimentos de onda em redes ópticas wdm,” Master’s thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Setembro 2003.
- [38] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology. New York, USA: Academic Press, 1999.
- [39] R. Ramaswami, “Optical fiber communication: from transmission to networking,” IEEE Comun. Mag., vol. 40, no. 5, pp. 138–147, 2002.
- [40] K. Liu, C. Liu, J. Pastor, A. Roy, and J. Wei, “Performance and testbed study of topology reconfiguration in ip over optical networks,” IEEE Transactions on Communications, vol. 50, no. 10, Outubro 2002.
- [41] C. A. Lima, “Redes ópticas wdm sem bloqueio,” Master’s thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Junho 2000.
- [42] J. Berthold, A. A. M. Saleh, L. Blair, and J. M. Simmons, “Optical networking: Past, present and future,” Journal Lightwave Technology, vol. 26, no. 9, pp. 1104–1118, 2008.
- [43] M. Murakami, “Analyzing power consumption in optical crossconnect equipment for future large-capacity optical networks,” JOURNAL OF NETWORKS, vol. 5, no. 11, pp. 1254–1259, Novembro 2010.
- [44] H. Kobrisnki and D. Zuckerman, “Applications of automated cross-connection in the optical layer,” Proc ECOC 98, vol. 1, pp. 64–65, 1999.
- [45] G. C. dos Santos, F. D. dos Santos, and J. C. R. F. de Oliveira, “Provisionamento automático de circuitos ópticos via plano de controle gmpls aplicado a uma rede óptica reconfigurável baseada em roadms,” XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2009.

- [46] Y. Chen, C. H. Chang, Y. Yang, I. Kuo, and T. Laing, "Mach-zehnder fiber-gratingbased fixed and reconfigurable multichannel optical add-drop multiplexers for dwdm networks," Optics Communications, vol. 169, pp. 245–262, Outubro 1999.
- [47] A. Banerjee, "Generalized multiprotocol label switching: An overview of routing and management enhancements," IEEE Communications Magazine, pp. 144–150, Janeiro 2001.
- [48] X. Cao, V. Anand, X. Xiong, and C. Qiao, "Performance evaluation of wavelength band switching in multi-fiber all-optical networks," IEEE INFOCOM, 2003.
- [49] C. Qiao and M. Yoo, "Optical burst switching (obs) - a new paradigm for an optical internet," Journal of High Speed Networks, pp. 69–84, 1999.
- [50] F. Callegati, H. Cankaya, Y. Xiong, and M. Vandenhoute, "Design issues of optical ip routers for internet backbone applications," IEEE Communications Magazine, pp. 124–128, Dezembro 1999.
- [51] F. G. Lins, "Desempenho de redes wdm com restrições sobre o número de transceptores por nó," Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, fevereiro 2004.
- [52] K. Inoue, H. Toba, and K. Nosu, "Multichannel amplification utilizing an  $er^{3+}$  doped fiber amplifier," IEEE Photonics Technologies Letters, vol. 9, no. 3, pp. 368–370, 1991.
- [53] G. P. Agrawal, Lightwave Technology : Telecommunication Systems. New Jersey, EUA:: John Wiley Sons, 2005.
- [54] A. Sharaiha, "Simultaneous in-line photodetection using semiconductor optical amplifier in presence of bi-directional transmission." Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, vol. 1, pp. 303–304, 1998.
- [55] R. de Oliveira Ribeiro, "Caracterização da conversão de comprimento de onda por modulação de ganho cruzado em amplificadores ópticos semicondutores," Master's thesis, PUC–Rio, Rio de Janeiro, RJ, Setembro 2005.
- [56] G. Keiser, Optical Fiber Communications, 3rd ed. McGraw-Hill, 2000.
- [57] T. Durhuus, "All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers," Journal Lightwave Technology, vol. 14, no. 6, pp. 955–966, Junho 1996.
- [58] A. Tzanakaki, I. Zacharopoulos, and I. Tomkos, "Optical add/drop multiplexers and optical crossconnects for wavelength routed networks," 5th International Conference on Transparent Optical Networks, vol. 1, pp. 41–46, 2003.
- [59] C. A. Sayeed, A. Vukovic, O. W. W. Yang, and H. Hua, "Hybrid low loss architecture for reconfigurable optical add/drop multiplexer," IEEE GLOBECOM, pp. 212–217, 2006.
- [60] P. Roorda and B. Collings, "Evolution to colorless and directionless roadm architectures," National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), 2008.
- [61] M. D. D. Bicudo, "Sobrevivência em redes ópticas transparentes," Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Dezembro 2005.

- [62] X. Cao, V. Anand, and C. Qiao, "Waveband switching in optical networks." IEEE Communications Magazine, vol. 3, no. 41, pp. 105–112, 2003.
- [63] M. Yoo, C. Qiao, and S. Dixit, "Qos performance of optical burst switching in ip-over-wdm networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, no. 10, pp. 2062–2071, 2000.
- [64] N. Khrais, A. Elrefaie, R. Wagner, and S. Ahmed, "Performance degradation of multiwavelength optical networks due to laser and (de)multiplexer misalignments," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 7, no. 11, pp. 1348–1350, novembro 1995.
- [65] J. D. e Aan Ruffin, "Analysis of signal distortion and crosstalk penalties induced by optical filters in optical networks," Journal of Lightwave Technology, vol. 21, no. 11, pp. 1876–1886, Setembro 2003.
- [66] K. Kitayama, "Code division multiplexing lightwave networks based upon optical code conversion," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 16, no. 7, pp. 1309–1319, 1998.
- [67] N. Karafolas and D. Uttamchandani., "Optical fiber code division multiple access networks: A review." Optical Fiber Technology, vol. 5, no. 2, pp. 149–168, Fevereiro 1996.
- [68] E. Mutafungwa, "Comparative analysis of the traffic performance of fiber-impairment limited wdm and hybrid ocdm/wdm networks." Photonic Network Communications, vol. 13, pp. 53–66, 2007.
- [69] M. S. Filho, T. Abrão, and L. D. H. Sampaio, "Alocação de potência em redes ópticas cdma particionadas," RITA, vol. 18, no. 2, pp. 267–294, 2011.
- [70] J. S. G. Panaro, "Contribuições ao estudo de sistemas ópticos de múltiplo acesso por divisão de códigos," Ph.D. dissertation, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Fevereiro 2005.
- [71] M. S. Filho, "Controle de potência em redes ópticas de múltiplo acesso ocdma," Master's thesis, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, Abril 2011.
- [72] R. V. B. dos Santos Filho, "Análise de sistemas cdma ópticos," Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.
- [73] J. A. Salehi, "Code division multiple-access techniques in optical fiber networks." IEEE Transactions on Communications, vol. 37, no. 8, pp. 824–833, Agosto 1989.
- [74] F. Chung, J. Salehi, and V. Wei, "Optical orthogonal codes: Design, analysis, and applications," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 35, no. 3, 1989.
- [75] A. M. Weiner, Joan Paul Heritage, and J. Salehi, "Encoding and decoding femtosecond pulses," Opt. Photon. Letters, vol. 13, no. 4, pp. 300–302, 1988.
- [76] J. Salehi, A. M. Weiner, and Joan Paul Heritage, "Temporal and statistics analysis of ultra short pulse code division multiple access communication networks," in NC, Boston MA, 1989.

- [77] D. Zaccarin and M. Kavehad, "An optical cdma system based on spectral encoding of led," IEEE Photonics Technologies Letters, vol. 4, no. 4, pp. 479–482, Abril 1993.
- [78] A. M. Weiner, Joan Paul Heritage, and E. M. Kirschner, "High-resolution femtosecond pulse shaping," Journal of Lightwave Technology, vol. 5, no. 8, pp. 1563–1572, 1988.
- [79] D. Zaccarin and M. Kavehad, "Performance evaluation of optical cdma systems using non-coherent detection and bipolar codes," Journal Lightwave Technology, vol. 12, no. 1, pp. 96–105, Janeiro 1994.
- [80] T. O'Farrell and S. Lochmann, "Performance analysis of an optical correlator receiver for ssk ds-cdma communication systems," IEEE Electronics Letters, vol. 30, no. 1, pp. 63–65, Janeiro 1994.
- [81] H. Sotobayashi, W. Chujo, and K. Kitayama, "Transparent virtual optical code/wavelength path network," IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 8, no. 3, pp. 699–704, maio 2002.
- [82] L. Galdino, "Análise de desempenho de redes ópticas híbridas wdm/ocdm," Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Outubro 2008.
- [83] M. Gupta and S. Singh, "Greening of the internet," in Proceedings of the 2003 conference on applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. SIGCOMM, 2003, pp. 19–26.
- [84] C. Kachris and I. Tomkos, "Power consumption evaluation of all-optical data center networks," Cluster Computers, 2013.
- [85] V. Eramo, "Comparison in power consumption of synchronous and asynchronous optical packet switches," Journal Lightwave Technology, vol. 28, no. 5, Março 2010.
- [86] R. S. Tucker, "Green optical communications—part ii: Energy limitations in networks," IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 17, no. 2, pp. 261–274, Março 2011.
- [87] C. Kachris and I. Tomkos, "Power consumption evaluation of all-optical data center networks," Cluster Computers, vol. 22, no. 16, pp. 611–623, 2013.
- [88] S. Kaneda, T. Uyematsu, N. Nagatsu, and K. Sato, "Network design and cost optimization for label switched multilayer photonic ip networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23, no. 8, Agosto 2005.
- [89] T. Battestilli and H. Perros, "An introduction to optical burst switching," IEEE Optical Communications, pp. 510–515, Agosto 2003.
- [90] K. Kitayama, "Photonic network rd activities in japan - current activities and future perspectives," Journal Lightwave Technology, vol. 23, no. 10, pp. 3404–3418, Outubro 2005.
- [91] J. Teng and G. Rouskas, "A comparison of the jit, jet and horizon wavelength reservation schemes on a single obs node," in Proc. The First International Workshop on Optical Burst Switching (WOBS), 2003.
- [92] K. Kitayama and N. Wada, "Photonic ip router," IEEE Photonics Technologies Letters, vol. 11, no. 12, pp. 1689–1691, Dezembro 1999.

- [93] O. Pedrola, D. Careglio, M. Klinkowski, J. Solé-Pareta, and K. Bergman., “Cost feasibility analysis of translucent optical networks with shared wavelength converters,” Journal of Optical Networking, vol. 5, no. 2, Fevereiro 2013.
- [94] N. phase 2 Document, “Migration guidelines with economic assessment and new business opportunities generated by nobel phase 2,” Networks for Braodband European Leadership (NOBEL), Tech. Rep., Março 2008.
- [95] H. Beyranvand and J. Salehi, “All-optical multiservice path switching in optical code switched gmpls core network,” Journal Lightwave Technology, vol. 27, no. 17, pp. 2001–20 012, 2009.
- [96] S. Huang, K. B. M. Murata, and K. Kitayama, “Architecture design and performance evaluation of multigranularity optical networks based on optical code division multiplexing,” Journal of Optical Networking, vol. 5, no. 12, pp. 1028 – 1042, Dezembro 2006.
- [97] F. R. Durand, L. Melo, L. R. A. Santos, and T. Abrão, “Optical network optimization based on particle swarm,” in Taufik Abrão (Org.), 1st ed., I. 978-953-51-0983-9, Ed. Intech, 2013, pp. 143–172.
- [98] F. R. Durand and T. Abrão, “Distributed snir optimization based on the verhulst model in optical code path routed networks with physical constraints,” Journal of Optical Communications Networking, vol. 3, no. 9, pp. 683–691, Setembro 2011.
- [99] G. P. Agrawal, Fiber-optic communication systems. John Wiley Sons, 2002.
- [100] M. Tang, C. Long, and X. Guan, “Nonconvex optimization for power control in wireless cdma networks,” IEEE Transactions on Communications, vol. 58, no. 4, pp. 851–865, 2011.
- [101] H. Yin and D. J. Richardson, Optical code division multiple access communication networks: theory and applications. Springer-Verlag and Tsinghua University Press, 2009.
- [102] G. Pavani, L. Zuliani, H. Waldman, and M. Magalhães, “Distributed approaches for impairment-aware routing and wavelength assignment algorithms in gmpls networks,” Computer Networks, vol. 52, no. 10, pp. 1905–1915, 2008.