



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

LUIS HENRIQUE HECKER DE CARVALHO

**REDES ÓPTICAS FLEXÍVEIS:
ANÁLISE DE DESEMPENHO EM
SISTEMAS ÓPTICOS DE ALTAS TAXAS**

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2011

LUIS HENRIQUE HECKER DE CARVALHO

REDES ÓPTICAS FLEXÍVEIS:
ANÁLISE DE DESEMPENHO EM
SISTEMAS ÓPTICOS DE ALTAS TAXAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Comunicações Ópticas

Orientador:

Professor José Ewerton P. de Farias, Dr. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2011

LUIS HENRIQUE HECKER DE CARVALHO

**REDES ÓPTICAS FLEXÍVEIS:
ANÁLISE DE DESEMPENHO EM
SISTEMAS ÓPTICOS DE ALTAS TAXAS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações Ópticas

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor José Ewerton P. de Farias, Dr. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, por não medirem esforços para que eu pudesse realizar os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em primeiro lugar, que me deu o apoio necessário me proporcionando a oportunidade de me dedicar exclusivamente aos estudos durante o período de graduação na UFCG.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Ewerton P. de Farias, por ter me dado a oportunidade de ingressar na área de comunicações ópticas e por todo o trabalho de orientação durante a graduação.

Ao Dr. Júlio César R. F. de Oliveira, engenheiro e pesquisador em telecomunicações da Fundação CPqD, co-orientador deste trabalho, pelo grande apoio e contribuição dados para a realização do mesmo.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, por terem sido essenciais para a minha formação acadêmica.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal a análise da alocação de canais em redes ópticas flexíveis, definindo planos de alocação otimizados para transmissão por meio da análise comparativa entre diferentes cenários. Redes ópticas flexíveis é um tema de pesquisas atual e em intensa atividade, estas redes possuem tráfego composto por diferentes formatos de modulação e taxas de transmissão, cenário inevitável nos sistemas ópticos atuais e futuros. Diferentes efeitos são responsáveis pela degradação de sinais em redes ópticas flexíveis, tais como a interferência entre canais vizinhos (*crosstalk*), e o efeito do afunilamento da banda de passagem, que se deve ao cascadeamento de filtros ópticos no sistema e a degradação da relação sinal-ruído óptica (OSNR). Após simulações, os resultados obtidos foram analisados levando em consideração efeitos degradantes ao sistema. Por fim, são determinados métodos de alocação ótimos que não penalizam o sistema e apresentam o melhor uso do espectro óptico disponível. Fez-se a opção de avaliar cenários com formatos de modulação OOK (*On-Off Keying*) e DP-QPSK (*Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying*), que possuem taxas de transmissão de 10 e 100 Gb/s, respectivamente. Canais de 10 Gb/s OOK são os mais utilizados nos sistemas ópticos atuais, enquanto o DP-QPSK é o novo formato de modulação padronizado pelo OIF (*Optical Internetworking Forum*) para transmissão óptica a 100 Gb/s.

Palavras-chave: redes ópticas flexíveis, taxas de transmissão, formatos de modulação, filtros ópticos, simulação, alocação de canais, OOK, DP-QPSK.

ABSTRACT

This work aims the analysis of channel allocation in flexible optical networks, defining optimized allocation plans for transmission trough the comparative analysis of different scenarios. Flexible optical networks is a topic of current intense research activity, the traffic in these networks consists of different modulation formats and transmission rates, an inevitable scenario in the current and future optical information transmission systems. Different effects are responsible for signal degradation in flexible networks, such as the interference between neighboring channels (crosstalk), the passband narrowing effect due to the cascading of optical filters in the system and the optical signal-to-noise ratio (OSNR) degradation. After simulations, the numerical results obtained were analyzed taking into account the degrading effects to the system. Finally, the optimal allocation methods which do not penalize the system and present the best use of the available optical spectrum are determined. The evaluated scenarios in this work used two types of modulation formats, the OOK (On-Off Keying) and the DP-QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying), with transmission rates of 10 and 100 Gb/s, respectively. The 10 Gb/s OOK channels are still commonly used in current optical transmission systems, while the DP-QPSK is a newer modulation format standardized by OIF (Optical Internetworking Forum) for optical transmission at 100 Gb/s.

Keywords: flexible optical networks, transmission rates, modulation formats, optical filters, simulation, channel allocation, OOK, DP-QPSK.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Operação de um OADM.	15
Figura 2: Arquitetura de ROADM bidirecional genérico com separabilidade leste-oeste.	16
Figura 3: Diagrama funcional de um bloqueador de comprimento de onda.	16
Figura 4: Arquitetura interna de um ROADM PLC.	17
Figura 5: Arquitetura interna de um ROADM.	18
Figura 6: Arquitetura interna de um DEMUX-T.	18
Figura 7: Diagrama funcional de uma chave WSS 1x4.	19
Figura 8: Funcionamento interno de uma chave WSS 1x4 com tecnologia LCoS.	19
Figura 9: (a) Arquitetura interna de um Cartão WSS. (b) Módulo de um Cartão WSS.	20
Figura 10: ROADM de grau 3 formado pela interconexão de Cartões WSS.	20
Figura 11: Espectro de canais com diferentes larguras de banda definidos em uma chave WSS.	21
Figura 12: Sistema de comunicação coerente.	22
Figura 13: Modulador de fase (PM).	23
Figura 14: Modulador de Mach-Zehnder.	23
Figura 15: Modulador em fase e quadratura (IQM).	23
Figura 16: Princípio da detecção coerente.	25
Figura 17: Detecção coerente de sinais modulados em fase e em quadratura.	26
Figura 18: Configuração de um receptor com diversidade de polarização.	28
Figura 19: Diagrama esquemático de um transmissor DP-QPSK.	29
Figura 20: Montagem de referência utilizada nas simulações.	30
Figura 21: Anel de recirculação utilizado nas simulações.	31
Figura 22: Alocação de canais. (A) Agrupados e (B) Intercalados.	32
Figura 23: Cenários (I-V) com alocação intercalada (canais de 100 e 10 Gb/s).	33
Figura 24: Cenários (VI-IX) com alocação agrupada (canais de 100 Gb/s).	33
Figura 25: Cenários (X-XV) com alocação agrupada (canais de 10 Gb/s).	34
Figura 26: Penalidade de OSNR.	36
Figura 27: Interferência entre canais adjacentes (<i>crosstalk</i>).	36
Figura 28: Filtragem óptica resultante do cascadeamento de filtros.	36
Figura 29: Curva de desempenho em <i>back-to-back</i> para transmissão a 100 Gb/s DP-QPSK.	38
Figura 30: Curva de desempenho em <i>back-to-back</i> para transmissão a 10 Gb/s OOK.	38
Figura 31: Curvas de BER x OSNR para canais 100G DP-QPSK NRZ com alocação intercalada.	39
Figura 32: Curvas de BER x OSNR para canais 100G DP-QPSK RZ com alocação intercalada.	39
Figura 33: Curvas de BER x OSNR para canais 10G OOK NRZ com alocação intercalada.	41
Figura 34: Curvas de BER x OSNR para canais 10G OOK RZ com alocação intercalada.	41
Figura 35: Curvas de BER x OSNR para canais 100G DP-QPSK NRZ com alocação agrupada.	42
Figura 36: Curvas de BER x OSNR para canais 100G DP-QPSK RZ com alocação agrupada.	42
Figura 37: Curvas de BER x OSNR para canais 10G OOK NRZ com alocação agrupada.	43
Figura 38: Curvas de BER x OSNR para canais 10G OOK RZ com alocação agrupada.	44
Figura 39: Fluxograma para alocação de canais de 10 Gb/s em redes ópticas flexíveis.	45
Figura 40: Fluxograma para alocação de canais de 100 Gb/s em redes ópticas flexíveis.	46
Figura 41: Cenário de rede flexível com canais de 10 e 100 Gb/s sem penalidades.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações dos dispositivos utilizados no anel de recirculação.....	31
Tabela 2: Parâmetros importantes dos cenários simulados.....	34
Tabela 3: Filtragem óptica na chave WSS para os cenários simulados.....	35
Tabela 4: Larguras de banda resultantes do cascadeamento de filtros ópticos.....	37
Tabela 5: Penalidades de OSNR para canais de 100G DP-QPSK NRZ com alocação intercalada.....	40
Tabela 6: Penalidades de OSNR para canais de 100G DP-QPSK RZ com alocação intercalada.....	40
Tabela 7: Penalidades de OSNR para canais de 10G OOK NRZ com alocação intercalada.....	41
Tabela 8: Penalidades de OSNR para canais de 10G OOK RZ com alocação intercalada.....	41
Tabela 9: Penalidades de OSNR para canais de 100G DP-QPSK NRZ com alocação agrupada.....	43
Tabela 10: Penalidades de OSNR para canais de 100G DP-QPSK RZ com alocação agrupada.....	43
Tabela 11: Penalidades de OSNR para canais de 10G OOK NRZ com alocação agrupada.....	44
Tabela 12: Penalidades de OSNR para canais de 10G OOK RZ com alocação agrupada.....	44

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vi
Abstract	vii
Lista de Ilustrações.....	viii
Lista de Tabelas.....	ix
Sumário	x
1 Introdução.....	11
2 Fundamentação Teórica.....	13
2.1 Evolução dos ROADMs	14
2.1.1 Bloqueadores de comprimentos de onda	15
2.1.2 Circuitos fotônicos planares	17
2.1.3 Chaves seletoras de comprimento de onda	18
2.1.4 Chaves seletoras de comprimento de onda flexíveis	21
2.2 Transmissão Óptica Coerente	22
2.2.1 Princípio da Detecção Coerente.....	25
2.2.2 Detecção coerente de sinais modulados em fase e em quadratura.....	26
2.2.3 Detecção de sinais com diversidade de polarização	27
2.2.4 Transmissão óptica a 100 Gb/s	28
3 Materiais e métodos.....	29
3.1 Montagem de referência para simulações	30
3.2 Cenários simulados	32
3.3 Método de análise	35
4 Resultados	37
4.1 Canais intercalados: Análise em 100 Gb/s DP-QPSK	38
4.2 Canais intercalados: Análise em 10 Gb/s OOK	40
4.3 Canais agrupados: Análise em 100 Gb/s DP-QPSK	42
4.4 Canais agrupados: Análise em 10 Gb/s OOK.....	43
4.5 Análise dos resultados.....	45
5 Conclusão	47
Bibliografia.....	48
Glossário.....	49

1 INTRODUÇÃO

Desde a popularização da internet em meados de 90, tem-se observado o crescente aumento da demanda por largura de banda nos sistemas de telecomunicações. Diversos serviços oferecidos pelas operadoras de telecomunicações atuais, tais como voz sobre o protocolo internet (*voice over internet protocol* – VoIP), televisão de alta definição (*high definition television* – HDTV), vídeo sob demanda (*video on demand* - VOD), entre outros, possuem relação direta com o aumento da demanda. O uso de taxas de transmissão cada vez mais altas é necessário para suprir essa necessidade por largura de banda. As comunicações ópticas se apresentam como solução para os sistemas de telecomunicações atuais e futuros, devido à ampla largura de banda da fibra óptica (RAMASWAMI e SIVARAJAN, 2002).

Apesar de ampla, alguns fatores limitam a largura de banda utilizada nos sistemas de comunicações ópticas, tais como o perfil de atenuação das fibras monomodo padrão (*standard single-mode fibers* – SSMF) e a faixa de ganho dos amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio (*erbium doped fiber amplifiers* – EDFA). Essa limitação em conjunto com o aumento da demanda por taxa de transmissão alertou as operadoras de que era necessário otimizar o uso do espectro óptico, impulsionando pesquisas intensivas nas áreas de transmissão e gerenciamento de redes.

Trabalhos recentes na área de transmissão óptica em altas taxas demonstraram experimentalmente comunicações bem sucedidas utilizando esquemas de modulação coerentes com taxas de transmissão da ordem de 100 Gb/s por canal em sistemas com multiplexação por divisão em comprimento de onda (*wavelength division multiplexing* – WDM) e alta eficiência espectral (SINSKY e WINZER, 2009) em comparação com os sistemas tradicionais por chaveamento liga-desliga (*on-off keying* – OOK). Esses sistemas apresentam um tráfego agregado na fibra da ordem de terabits por segundo, alcançando milhares de quilômetros com transmissão sem erro. Sistemas comerciais operando a taxas de 100 Gb/s já estão disponíveis (VERIZON, 2010). A restrição de banda imposta pelos padrões da União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunications Union* – ITU) torna a eficiência espectral um

parâmetro crítico para sistemas operando com essas taxas de transmissão. Pesquisas atuais já visam a evolução dos sistemas de transmissão óptica para taxas de 400 Gb/s e 1 Tb/s por canal (TROWBRIDGE, 2010).

Assim como a demanda por largura de banda e os serviços prestados na camada de transporte das redes de telecomunicações aumentam, também aumenta a necessidade das operadoras por capacidade de rede. Para suportar as constantes variações nas taxas de transmissão e serviços prestados, as redes devem ser flexíveis o suficiente para atender a diversos requerimentos sob demanda. Como resultado, as operadoras estão implementando multiplexadores insere/deriva ópticos reconfiguráveis (*reconfigurable optical add/drop multiplexers* – ROADM) para construir uma camada óptica automatizada com conectividade multiponto dinâmica, inserção e remoção de comprimentos de onda independentes, alocação de banda remota e gerenciamento de potência em redes WDM densas (*dense wavelength division multiplexing* – DWDM). Nesse processo, os ROADMs estão eliminando pontos de regeneração intermediários e transições óptico-elétrico-óptico (O-E-O), resultando em menores custos de instalação e gerenciamento de rede simplificado. ROADMs também estão ajudando as operadoras na interconexão de diversas topologias de rede e assegurando transparência de protocolo, permitindo o tráfego de serviços SONET/SDH, Ethernet, entre outros, em uma mesma rede (COLLINGS e ROORDA, 2011).

Transmissões de dados em altas taxas irão necessitar de redes que forneçam alocações de banda maiores e variáveis para seus canais, fora dos padrões atuais especificados pela ITU. Uma maior eficiência em transmissões de baixas taxas, que pode ser alcançada reduzindo o espaçamento entre canais, também é necessária para atender o crescimento contínuo do tráfego da rede. Em uma rede heterogênea com tráfego composto de diferentes taxas de transmissão e formatos de modulação, ambos os requerimentos devem ser atendidos simultaneamente. Isso requer um gerenciamento flexível de alocação de banda para os canais, não disponível nas redes ópticas atuais que seguem os espaçamentos especificados pela ITU (AMAYA, MUHAMMAD, *et al.*, 2011). Nesse contexto são definidas as redes ópticas flexíveis ou *gridless*, pois não possuem um padrão de espaçamento pré-definido entre seus canais. São redes modernas capazes de transportar, gerenciar e rotear canais com diferentes formatos de modulação e largura de banda, com o objetivo de otimizar a ocupação do espectro óptico (AMAYA, IRFAN, *et al.*, 2011).

Redes ópticas compostas por canais de 10 Gb/s OOK representam a maior parte dos sistemas instalados (WANG, ZHANG, *et al.*, 2011). Este trabalho busca determinar a melhor maneira de alocar e espaçar canais do novo padrão de 100 Gb/s utilizando modulação DP-QPSK (*Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying*) e canais de 10 Gb/s OOK nessas redes legadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fase de pesquisas em sistemas de comunicações ópticas teve início em 1975. O enorme progresso em 25 anos, se estendendo de 1975 a 2000, pode ser agrupado em várias gerações distintas (AGRAWAL, 2002).

A primeira geração dos sistemas de comunicações possuía comprimento de onda de operação de 0.8 μm e usava lasers semicondutores a base de arseneto de gálio (GaAs). Tais sistemas se tornaram disponíveis comercialmente em 1980, operavam a uma taxa de 45 Mb/s e permitiam espaçamento entre repetidores de até 10 km. O maior espaçamento entre repetidores em comparação aos sistemas de cabos coaxiais diminuiu os custos de instalação e manutenção associados aos repetidores.

O espaçamento entre repetidores poderia ser aumentado alterando o ponto de operação para 1,3 μm , onde as perdas na fibra são menores que 1 dB/km e a dispersão é mínima. A dispersão intermodal nas fibras multimodo limitava a taxa de transmissão em no máximo 100 Mb/s, essa limitação foi superada com o uso de fibras com modo de propagação único (monomodo). Em 1987, a segunda geração dos sistemas de comunicações ópticas estava disponível comercialmente, operando a taxas de 1,7 Gb/s e espaçamento entre repetidores de 50 km.

A criação de fibras ópticas com dispersão deslocada (*dispersion shifted fibers* - DSF) e lasers de modo longitudinal único (*single longitudinal mode* – SLM) superaram as limitações impostas pela dispersão na região espectral de 1,5 μm , onde a perda da fibra é mínima (0,2 dB/km). A terceira geração dos sistemas ópticos operando em 1,5 μm com taxas de transmissão de 2,5 Gb/s e espaçamento entre repetidores de 70 km entrou no mercado em 1990, tais sistemas podiam alcançar taxas de até 10 Gb/s.

A quarta geração dos sistemas de comunicações ópticas faz uso da amplificação óptica para aumentar o espaçamento entre repetidores e permitir a realização de

sistemas WDM, aumentando a taxa de transmissão agregada na fibra. O advento da técnica WDM iniciou uma revolução, dobrando a capacidade dos sistemas e levando-os a transmissões em taxas de 10 Tb/s por volta de 2001 (AGRAWAL, 2002). Na maioria dos sistemas WDM, as perdas na fibra são compensadas periodicamente utilizando EDFAs espaçados de 60 a 80 km. O uso da amplificação óptica possibilitou a transmissão sem o uso de repetidores e transições O-E-O por milhares de km, tornando realizável a implantação de sistemas submarinos comerciais em 1996. Claramente, os sistemas da quarta geração revolucionaram todo o campo das comunicações ópticas.

Atualmente, os sistemas WDM estão encontrando o seu limite. Formatos avançados de modulação com alta eficiência espectral estão sendo estudados com o objetivo de aumentar a taxa de transmissão sem alterar ou até mesmo diminuir a largura de banda dos canais, esse tipo de transmissão é possível apenas utilizando transmissão coerente e processamento digital de sinais (PDS) na recepção. Trabalhos recentes buscam determinar algoritmos de alocação e espaçamento entre canais em redes com múltiplas taxas de transmissão e formatos de modulação, com o objetivo de otimizar o uso do espectro óptico (WANG, ZHANG, *et al.*, 2011).

Na seção 2.1 será apresentada a evolução dos ROADMs nas redes ópticas e a seção 2.2 aborda a transmissão óptica coerente utilizada em sistemas de altas taxas.

2.1 EVOLUÇÃO DOS ROADMS

Dado que a tecnologia DWDM transporta informações independentes em comprimentos de onda separados, o uso de filtragem óptica para separar e rotear comprimentos de onda específicos foi provado ser uma abordagem de ótimo custo-benefício para gerenciar o tráfego em redes ópticas (COLLINGS e ROORDA, 2011).

Antes da introdução das redes reconfiguráveis, os sistemas WDM eram normalmente constituídos por transmissões ponto-a-ponto interconectando regeneradores ou repetidores com filtros ópticos fixos e transições O-E-O para todos os canais do sistema. Com o aumento do número de canais e alcance dos sistemas WDM, se tornou possível e desejável o tráfego transparente nas redes ópticas, simplificando os nós e eliminando o uso de transições O-E-O indesejadas. Para permitir essas operações, multiplexadores insere/deriva ópticos (*optical add/drop multiplexers* – OADM) fixos,

foram introduzidos nas redes. Esses dispositivos possuem filtros ópticos fixos que determinam quais canais são removidos e inseridos em cada nó de uma rede (Figura 1).

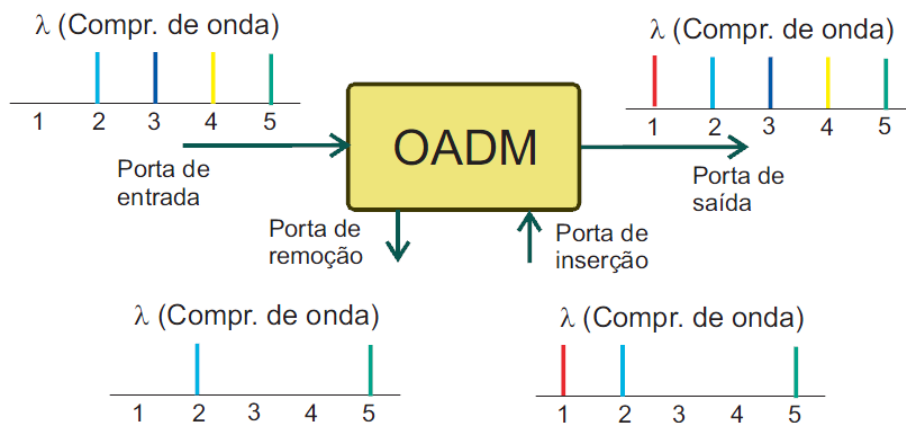


Figura 1: Operação de um OADM.

Atualmente, as operadoras de rede enfrentam exigências de maiores larguras de banda, tráfego imprevisível, topologias dinâmicas e um mercado cada vez mais competitivo. Portanto, muitas operadoras se beneficiam da tecnologia dos ROADMs para gerenciar canais em redes ópticas de uma forma flexível e remota sem interromper o tráfego existente, fornecendo uma estrutura transparente e independente de taxa de transmissão e formato de modulação dos canais.

Redes baseadas em ROADMs oferecem um nível mais alto de monitoração, gerenciamento de potência e roteamento de comprimentos de onda na camada de transporte de uma rede óptica. Essas funcionalidades resultam em reduções de custos operacionais e, principalmente, intervalos para ativações de novos serviços na rede.

As seções 2.1.1 a 2.1.4 apresentam diferentes tecnologias utilizadas na fabricação de ROADMs.

2.1.1 BLOQUEADORES DE COMPRIMENTOS DE ONDA

A reconfigurabilidade com granularidade de comprimento de onda foi inicialmente introduzida em nós de grau 2, utilizando uma arquitetura típica ilustrada na Figura 2. O grau de um ROADM é definido pelo número de pares de fibras de linha que ele possui. Um divisor óptico na fornece uma cópia de todos os comprimentos de onda de entrada para a porta de remoção. Uma estrutura similar permite adicionar qualquer conjunto de comprimentos de onda na porta de inserção. O componente crítico nessa arquitetura é o que realiza a operação de bloqueio seletivo, um dispositivo de duas

portas que bloqueia qualquer combinação de comprimentos de onda em sua porta de saída, permitindo a inserção de sinais nos mesmos comprimentos de onda que foram bloqueados por ele. Na primeira geração dos ROADMs, esse dispositivo era chamado de bloqueador de comprimento de onda (*wavelength blocker* – WB).

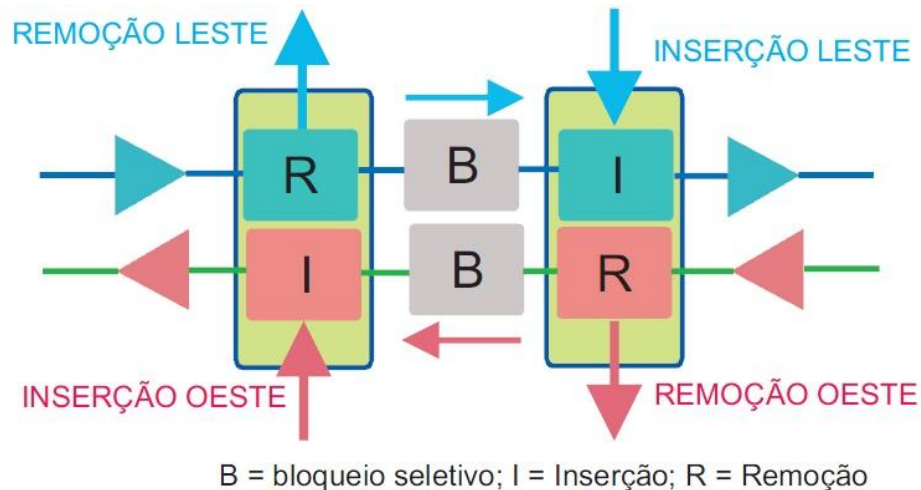


Figura 2: Arquitetura de ROADM bidirecional genérico com separabilidade leste-oeste.

Em geral, dispositivos WB são compostos por três estágios funcionais ilustrados na Figura 3. No primeiro estágio, comprimentos de onda são separados espacialmente por elementos dispersivos como, por exemplo, uma grade de difração. Cada canal encontra um elemento de atenuação controlado individualmente, onde acontece a operação de bloqueio. Finalmente, os canais individualmente selecionados são recombinados em uma única fibra de saída. Assim, comprimentos de onda podem ser atenuados de forma independente, permitindo operações de bloqueio e equalização de canais.

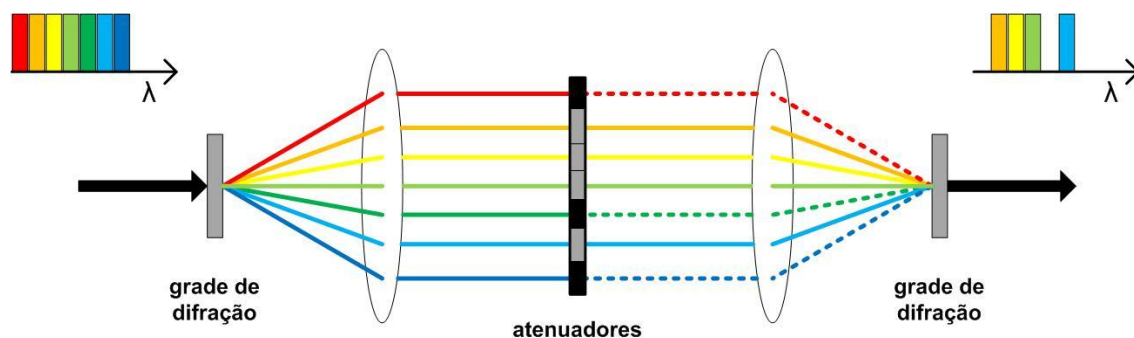


Figura 3: Diagrama funcional de um bloqueador de comprimento de onda.

Essa arquitetura apresenta diversas vantagens, tais como bom custo-benefício, configurabilidade remota, capacidade de inserção/remoção de todos os comprimentos de onda do sistema WDM e boa performance óptica. No entanto, ROADMs baseados em

WB requerem o uso de um extenso conjunto de componentes, consequentemente, aumentando sua complexidade e reduzindo sua confiabilidade.

2.1.2 CIRCUITOS FOTÔNICOS PLANARES

Uma alternativa recente para a implementação de ROADMs é o uso de circuitos fotônicos planares (*planar lightwave circuits – PLC*). A integração e encapsulamento desses elementos reduziram os custos em relação às arquiteturas com WB. Circuitos para monitoramento de potência óptica podem ser facilmente integrados ao componente PLC, permitindo uma leitura rápida e precisa dos níveis de potência em todas as portas do dispositivo. Uma arquitetura comum de um ROADM PLC é ilustrada na Figura 4. Nessa arquitetura o ROADM é formado pela interconexão de dois tipos de dispositivos, o módulo de inserção óptico reconfigurável (*reconfigurable optical add module – ROAM*) e o demultiplexador monitorado (*monitored demultiplexer – DEMUX-T*), ilustrados nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Operações de chaveamento, inserção de canais, equalização dinâmica de canais (*dynamic channel equalization – DCE*) e monitoramento óptico de canais (*optical channel monitoring – OCM*) são realizadas pelo ROAM. No DEMUX-T são realizadas as operações de remoção de canais e OCM, um atenuador óptico variável (*variable optical attenuator – VOA*) é utilizado para regular a potência na recepção.

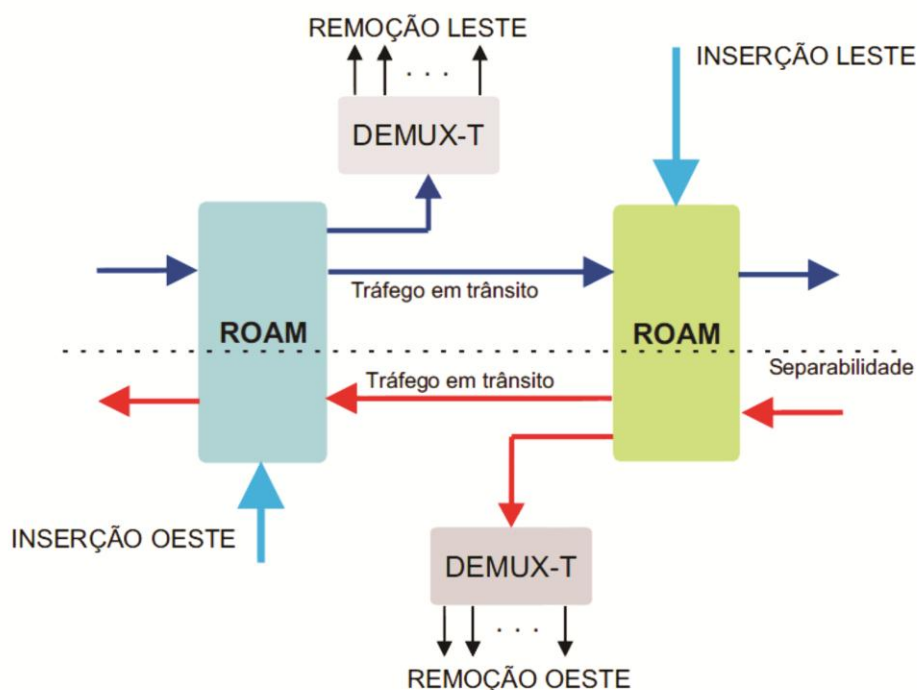


Figura 4: Arquitetura interna de um ROADM PLC.

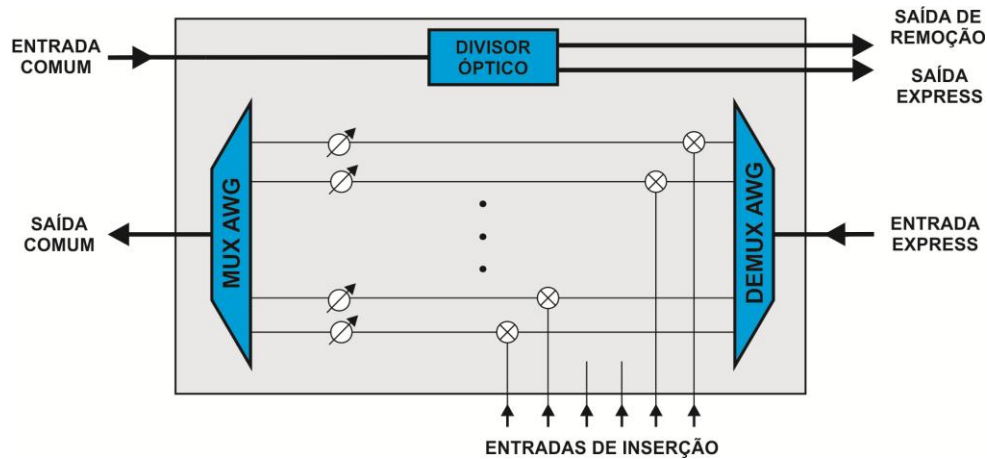


Figura 5: Arquitetura interna de um ROADM.

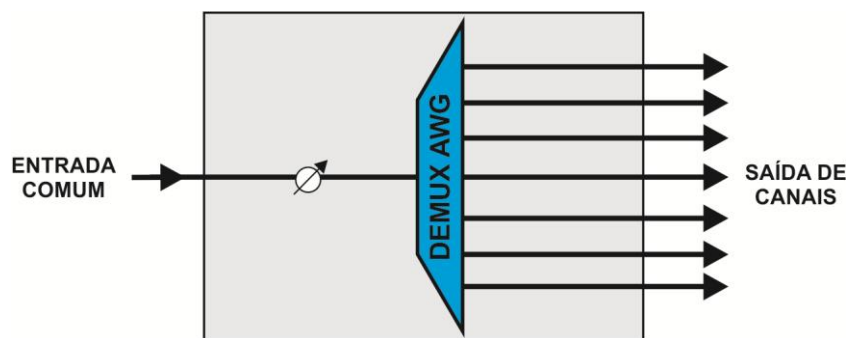


Figura 6: Arquitetura interna de um DEMUX-T.

Apesar das vantagens introduzidas pela tecnologia PLC, arquiteturas desses ROADMs são limitadas em grau 2 e o projeto de multiplexadores e demultiplexadores AWG (*arrayed waveguide grating*) com filtros planos em sua banda de passagem é complexo e caro. A planicidade dos filtros nos AWGs é um fator que limita o número de ROADMs PLC cascadeados em uma rede óptica (FARIAS, CARVALHO, *et al.*, 2010).

2.1.3 CHAVES SELETORAS DE COMPRIMENTO DE ONDA

A tecnologia da terceira geração dos ROADMs e também a dominante nos sistemas atuais é a chave seletora de comprimento de onda (*wavelength selective switch* – WSS). A Figura 7 ilustra o funcionamento básico de um WSS 1x4, são dispositivos capazes de rotear qualquer canal presente na porta de entrada para qualquer porta de saída. Operações de equalização e monitoração de canais são realizadas nessas chaves, que normalmente são dispositivos bidirecionais.

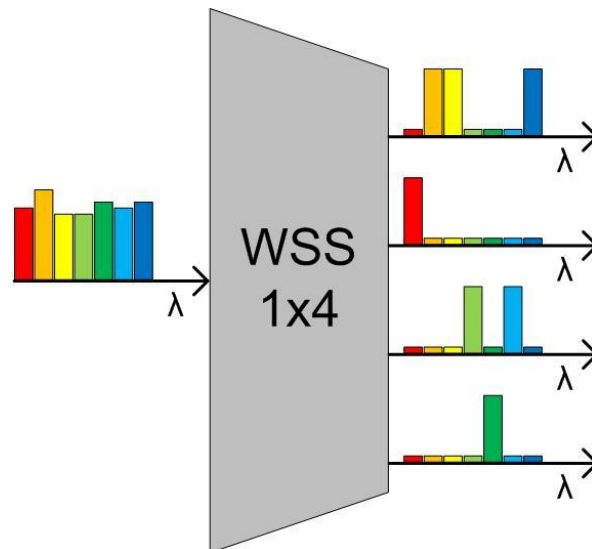


Figura 7: Diagrama funcional de uma chave WSS 1x4.

O projeto de WSS pode ser realizado com o uso de diferentes tecnologias, tais como sistemas micro-elétrico-mecânicos (*micro-electro-mechanical systems* – MEMS) e cristal líquido em silício (*liquid crystal on silicon* – LCoS), essas tecnologias são utilizadas para direcionar individualmente os comprimentos de onda para as portas de saída desejadas.

O funcionamento interno de uma chave WSS com tecnologia LCoS é ilustrado na Figura 8. O sinal WDM de entrada é separado em comprimentos de onda individuais por um elemento dispersivo, cada canal é direcionado para uma porta de saída desejada de forma independente pelo dispositivo atuador (arranjo de LCoS).

Atuadores LCoS são compostos por um grande arranjo bidimensional de moduladores de fase ópticos. O desvio angular é obtido estabelecendo um perfil de atraso de fase variável em uma direção do arranjo bidimensional. Essa manipulação da fase do sinal óptico faz com que o mesmo seja desviado de um ângulo proporcional à taxa de variação do atraso de fase através do arranjo (COLLINGS e ROORDA, 2011).

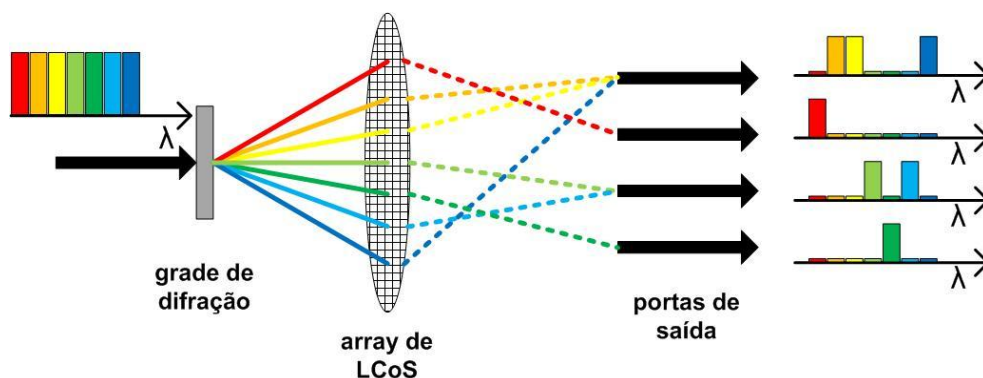


Figura 8: Funcionamento interno de uma chave WSS 1x4 com tecnologia LCoS.

Uma grande vantagem da tecnologia WSS é a realização de ROADMs de grau maior que 2, utilizados na interconexão de redes. Um módulo chamado Cartão WSS pode ser conectado com outros módulos para formar ROADMs de grau N-1 utilizando chaves WSS 1xN, como ilustrado nas Figuras 9 e 10.

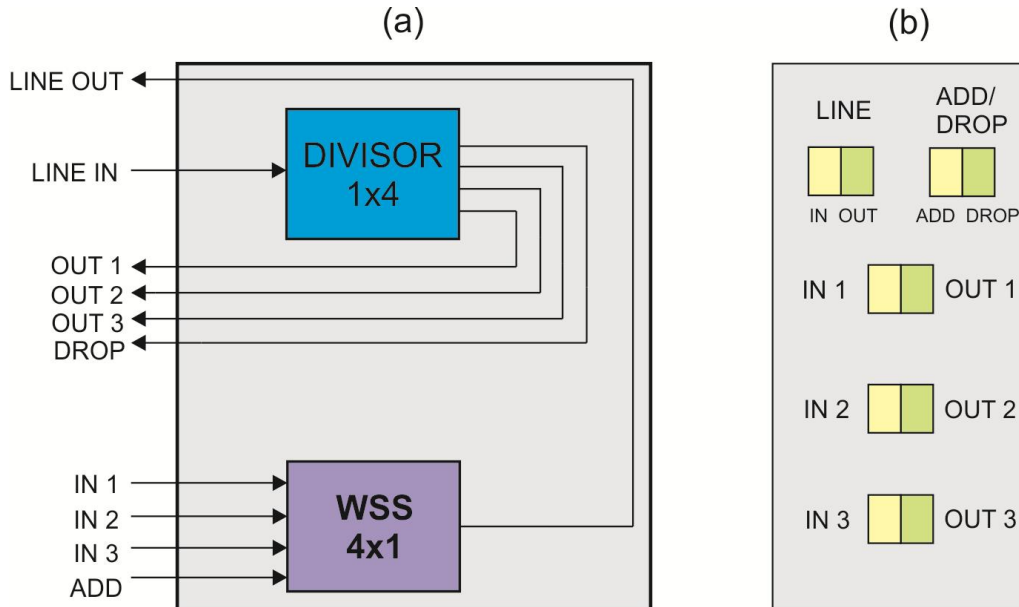


Figura 9: (a) Arquitetura interna de um Cartão WSS. (b) Módulo de um Cartão WSS.

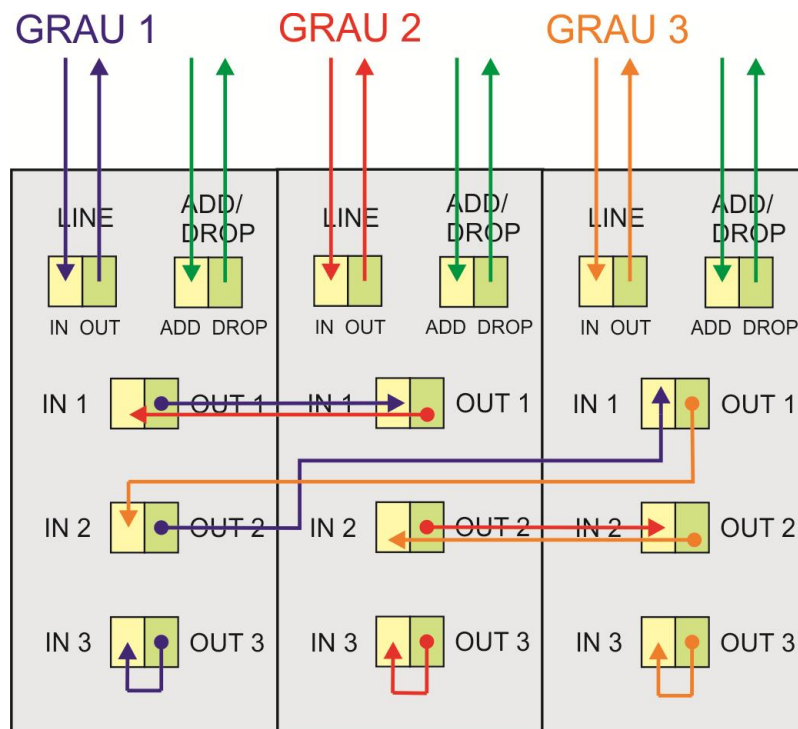


Figura 10: ROADM de grau 3 formado pela interconexão de Cartões WSS.

Os parâmetros críticos do WSS são a largura espectral dos canais, formato dos filtros e supressão de canais em portas indesejadas. Para suportar canais de altas taxas,

uma largura de banda ampla e retangular dos filtros é desejada para evitar o afunilamento da banda após uma cascata de ROADMs.

Chaveamento com tecnologia LCoS permite escolha de espaçamento entre canais (50 ou 100 GHz), controle de atenuação, transmissão de canais para múltiplas portas de saída, isolamento entre portas de 40 dB e filtros com banda de passagem plana.

2.1.4 CHAVES SELETORAS DE COMPRIMENTO DE ONDA FLEXÍVEIS

Em redes ópticas flexíveis compostas de sinais com diferentes formatos de modulação e taxas de transmissão, diferentes canais podem possuir diferentes larguras de banda. Para suportar esse tipo de tráfego, as chaves WSS tiveram que evoluir para realizar as operações de chaveamento em canais com diferentes larguras de banda.

A tecnologia LCoS se apresentou como a melhor opção para esse novo conceito de ROADMs. A largura de banda para cada canal pode ser variável utilizando uma quantidade diferente de pontos do arranjo para cada caso. O espectro óptico é dividido em fatias de 12,5 GHz e os canais são definidos combinando fatias vizinhas, formando canais com largura de banda configurável (Figura 11).

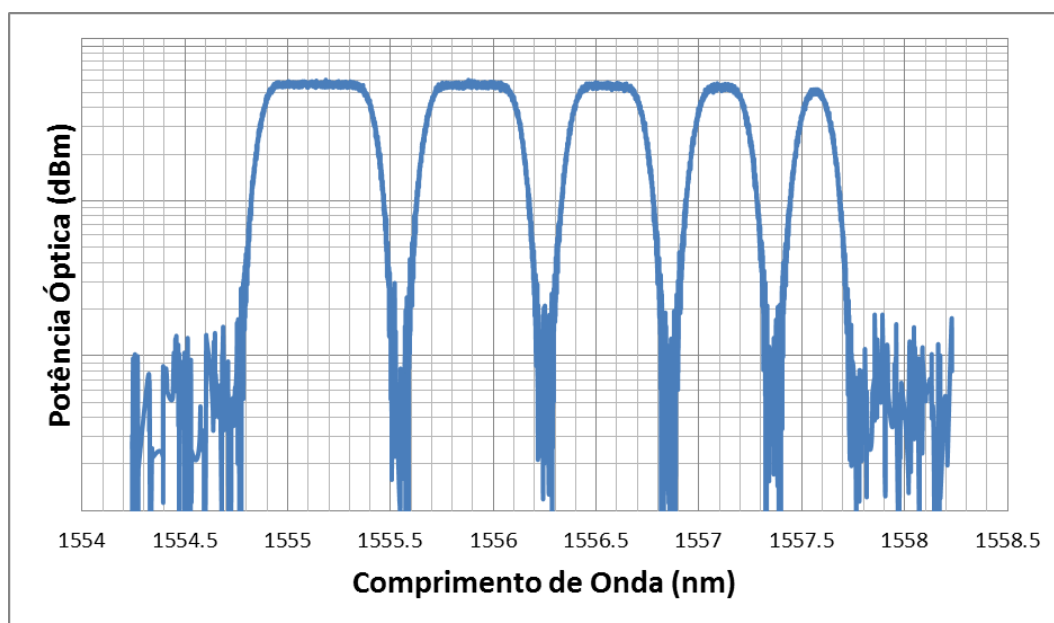


Figura 11: Espectro de canais com diferentes larguras de banda definidos em uma chave WSS.

Os fabricantes atuais de chaves WSS flexíveis permitem a definição de largura de banda para um canal mínima de 25 GHz, ou seja, a combinação de no mínimo duas fatias de 12,5 GHz vizinhas para definir um canal é necessária.

2.2 TRANSMISSÃO ÓPTICA COERENTE

O diagrama de blocos básico de um sistema de comunicação coerente é ilustrado na Figura 12. O sistema apresentado é composto por um transmissor, um canal de comunicação e um receptor.

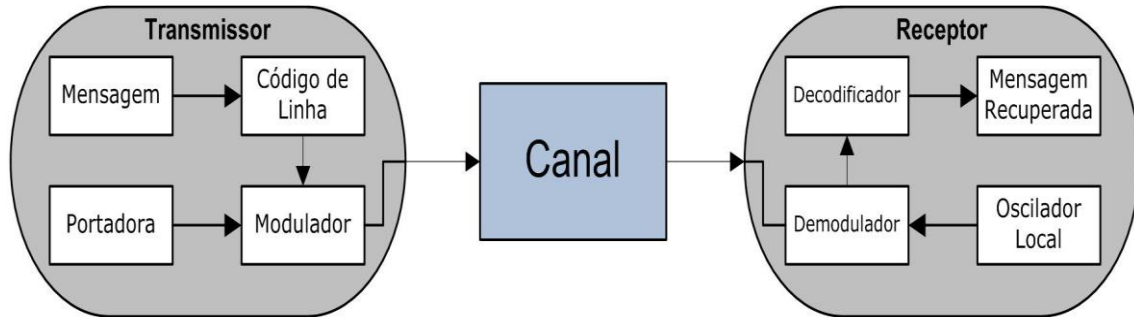


Figura 12: Sistema de comunicação coerente.

No transmissor, a informação binária da mensagem é representada no domínio elétrico por um código de linha, que define o formato do pulso enviado ao modulador. A portadora é utilizada para transladar o espectro do sinal mensagem para uma frequência maior, onde é possível a propagação do sinal modulado pelo canal de comunicação. Em sistemas coerentes, o oscilador local (*local oscillator – LO*) no receptor deve possuir a mesma frequência que a portadora. O sinal modulado é dado por:

$$s(t) = m(t) \cdot p(t), \quad (1)$$

onde $p(t)$ representa a portadora utilizada na transmissão e $m(t)$ é o sinal mensagem em banda básica. O sinal mensagem e a portadora são dados por:

$$m(t) = \sum a_k \cdot e^{j\varphi_k} \cdot f(t - kT_s), \quad (2)$$

$$p(t) = A \cdot \cos(\omega_c t), \quad (3)$$

onde $f(t)$ é o pulso base correspondente ao código de linha utilizado, T_s é o tempo de símbolo e $a_k \cdot e^{j\varphi_k}$ é a representação complexa do símbolo transmitido, definido pelo formato de modulação utilizado.

Em sistemas ópticos coerentes o sinal da portadora é gerado por um laser de onda contínua (*continuous wave – CW*) e um modulador em fase e quadratura

(*in-phase/quadrature modulator* – IQM) é normalmente utilizado na transmissão (SEIMETZ, 2009).

O campo elétrico de uma portadora óptica pode ser expresso pela seguinte notação complexa:

$$\mathbf{E}_c(t) = \sqrt{P_s} \cdot e^{j(\omega_s t + \varphi_s)} \cdot \mathbf{e}_s, \quad (4)$$

onde $\sqrt{P_s}$ representa a amplitude do campo, $(\frac{\omega_s}{2\pi})$ a frequência [Hz], φ_s a fase inicial [rad] e \mathbf{e}_s o vetor de polarização da portadora. Os valores de frequência utilizadas em sistemas ópticos são da ordem de 190 THz.

Moduladores IQM são construídos aliando moduladores de Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder modulator* – MZM) e moduladores de fase (*phase modulator* – PM), como ilustrado nas Figuras 13-15. Nessa configuração, os moduladores MZM atuam como moduladores de amplitude, enquanto o modulador PM é utilizado para defasar o sinal em 90°.

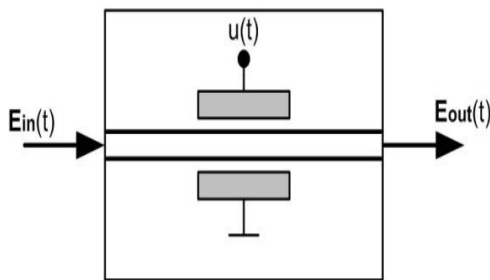


Figura 13: Modulador de fase (PM).

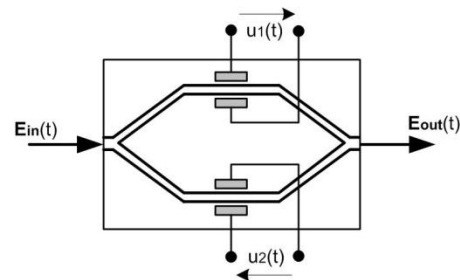


Figura 14: Modulador de Mach-Zehnder.

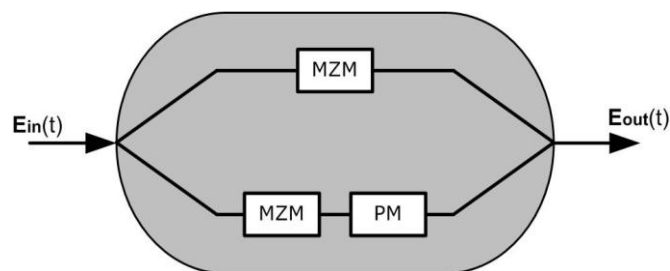


Figura 15: Modulador em fase e quadratura (IQM).

Em um modulador PM, a tensão aplicada $u(t)$ varia o índice de refração do guia de onda presente no substrato eletro-óptico e, portanto, o campo elétrico da portadora óptica incidente pode ser modulado em fase. A relação entre a portadora óptica de entrada e o campo óptico de saída pode ser expressa como:

$$\mathbf{E}_{out}(t) = \mathbf{E}_{in}(t) \cdot e^{j\frac{u(t)}{V\pi}}. \quad (5)$$

Utilizando um modulador MZM com $u_1(t) = -u_2(t) = \frac{u(t)}{2}$ [V] e $V_{\pi 1} = V_{\pi 2} = V_{\pi}$ [V] (modo de operação *push-pull*), onde V_{π} é a tensão aplicada necessária para alcançar um defasamento de π , é obtida uma modulação em amplitude do campo de entrada. A relação entre os campos de entrada e saída é dada por:

$$\mathbf{E}_{out}(t) = \mathbf{E}_{in}(t) \cdot \cos\left(\frac{u(t)}{2V\pi} \pi\right). \quad (6)$$

Combinando moduladores MZM e PM é possível construir um modulador IQM, como ilustrado na Figura 15. Esse tipo de modulador permite a transmissão de diferentes constelações, geralmente limitado pelos parâmetros físicos do modulador.

Sistemas coerentes possuem uma grande vantagem na transmissão usando formatos de modulação de altas ordens, pois todos os parâmetros do campo óptico (amplitude, fase e polarização) são transferidos para o domínio elétrico na detecção coerente, permitindo a aplicação de técnicas de processamento digital de sinais na recepção.

Os detectores coerentes se dividem em 3 tipos, os detectores homodinos, os heterodinos e os intradinos.

Nos detectores homodinos o LO deve ter exatamente a mesma frequência que o laser na transmissão e a diferença de fase entre ambos deve ser 0 ou 2π . Detectores desse tipo apresentam uma melhor sensibilidade, no entanto, a realização de um circuito para travamento de fase e frequência é bastante complexo.

Detectores heterodinos apresentam diferença de frequência entre o LO e o laser de transmissão igual a uma frequência intermediária (IF). Apresentam sensibilidade inferior aos homodinos e também necessitam de componentes elétricos com banda bem superior a do sinal.

Nos detectores intradinos a frequência dos sinais não são exatamente iguais, porém são muito próximas. Nesse caso, a coerência entre oscilador local e portadora é obtida no domínio digital com o uso de PDS. Apesar de apresentarem sensibilidade inferior aos detectores homodinos, o uso de PDS proporciona uma grande redução na complexidade nos receptores.

2.2.1 PRINCÍPIO DA DETECÇÃO COERENTE

Em um esquema básico de detecção coerente, o sinal modulado e o LO interferem para gerar uma corrente elétrica proporcional ao sinal mensagem (Figura 16).

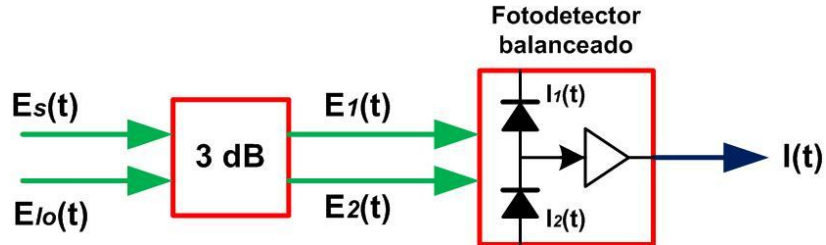


Figura 16: Princípio da detecção coerente.

Os campos elétricos do oscilador local e do sinal recebido podem ser expressos como:

$$\mathbf{E}_{l_0}(t) = \sqrt{P_{l_0}} \cdot e^{j(\omega_{l_0}t + \varphi_{l_0})} \cdot \mathbf{e}_{l_0}, \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_s(t) = \sqrt{P_s} \cdot e^{j(\omega_s t + \varphi_s)} \cdot a(t) \cdot e^{j\varphi(t)} \cdot \mathbf{e}_s, \quad (8)$$

onde, respectivamente ao oscilador local e portadora, $\sqrt{P_{l_0}}$ e $\sqrt{P_s}$ representam as amplitudes dos campos, ω_{l_0} e ω_s são as frequências angulares $\left[\frac{rad}{s}\right]$, φ_{l_0} e φ_s são os ângulos de fase iniciais e \mathbf{e}_{l_0} e \mathbf{e}_s são os vetores que indicam o estado de polarização do campo (SEIMETZ, 2009). Os símbolos da constelação recebida são definidos por $a(t)$ e $e^{j\varphi(t)}$.

O batimento entre o LO e o sinal ocorre no acoplador de 3 dB, resultando nos campos elétricos $\mathbf{E}_1(t)$ e $\mathbf{E}_2(t)$, que servem de entrada para o fotodetector balanceado. As correntes em cada fotodetector são dadas por:

$$I_1(t) = \frac{1}{2}RP_s \cdot a^2(t) + \frac{1}{2}RP_{l_0} + R\sqrt{P_s P_{l_0}} \cdot a(t) \cdot \mathbf{e}_s \mathbf{e}_{l_0} \cdot \text{sen}(\Delta\omega t + \varphi(t)), \quad (9)$$

$$I_2(t) = \frac{1}{2}RP_s \cdot a^2(t) + \frac{1}{2}RP_{l_0} - R\sqrt{P_s P_{l_0}} \cdot a(t) \cdot \mathbf{e}_s \mathbf{e}_{l_0} \cdot \text{sen}(\Delta\omega t + \varphi(t)), \quad (10)$$

onde R representa a responsividade dos fotodetectores $\left[\frac{A}{W}\right]$ e $\Delta\omega$ é a diferença de frequência entre o LO e o sinal.

A corrente de saída do fotodetector balanceado é dada pela equação (11). É observado que o valor da corrente é diretamente proporcional aos valores de amplitude e fase do sinal recebido. Desse modo, toda a informação modulada na portadora é transferida para $I(t)$.

$$I(t) = 2R\sqrt{P_s P_{lo}} \cdot a(t) \cdot \text{sen}(\Delta\omega t + \varphi(t)) \cdot e_s \cdot e_{lo}. \quad (11)$$

Em sistemas coerentes com receptores intradinos, algoritmos de estimação de fase e frequência são aplicados ao sinal de saída do fotodetector balanceado para compensar os desvios entre o LO e a portadora.

2.2.2 DETECÇÃO COERENTE DE SINAIS MODULADOS EM FASE E EM QUADRATURA

Para ser possível a detecção das componentes em fase e em quadratura de sinais modulados com formatos de modulação de alta ordem, um esquema de recepção como ilustrado na Figura 17 deve ser empregado. Nesse tipo de receptor o sinal e o LO são combinados em uma híbrida 90° 2×4 , cujas saídas servem como entrada para dois fotodetectores balanceados.

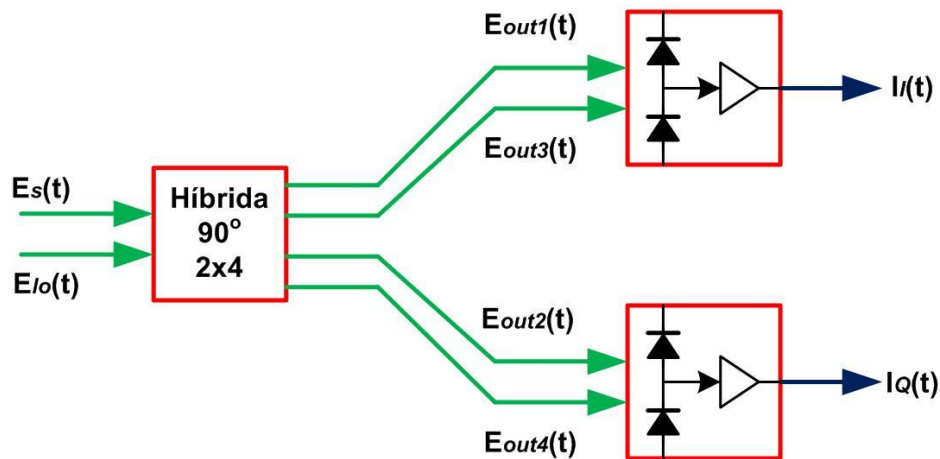


Figura 17: Detecção coerente de sinais modulados em fase e em quadratura.

A híbrida é um dispositivo passivo de fundamental importância em receptores coerentes, pois permite a detecção dos componentes em fase e em quadratura de um sinal óptico. Em uma situação ideal, as saídas da híbrida são definidas por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{out1}(t) \\ \mathbf{E}_{out2}(t) \\ \mathbf{E}_{out3}(t) \\ \mathbf{E}_{out4}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_s(t) + \mathbf{E}_{lo}(t) \\ \mathbf{E}_s(t) + j\mathbf{E}_{lo}(t) \\ \mathbf{E}_s(t) - \mathbf{E}_{lo}(t) \\ \mathbf{E}_s(t) - j\mathbf{E}_{lo}(t) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Como é necessário que os campos de entrada em um fotodetector balanceado estejam defasados de π radianos, os pares $(\mathbf{E}_{out1}(t), \mathbf{E}_{out3}(t))$ e $(\mathbf{E}_{out2}(t), \mathbf{E}_{out4}(t))$ são entradas de diferentes fotodetectores balanceados. As correntes em fase e em quadratura obtidas nas saídas dos fotodetectores são dadas por:

$$I_I(t) = 2R\sqrt{P_s P_{lo}} \cdot a(t) \cdot \cos(\Delta\omega t + \varphi(t)) \cdot \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{e}_{lo}, \quad (13)$$

$$I_Q(t) = 2R\sqrt{P_s P_{lo}} \cdot a(t) \cdot \sin(\Delta\omega t + \varphi(t)) \cdot \mathbf{e}_s \cdot \mathbf{e}_{lo}. \quad (14)$$

O funcionamento dessa detecção coerente é limitado pelo tempo de resposta, responsividade (R) dos fotodetectores balanceados e pelo ruído que estes adicionam ao sinal (SEIMETZ, 2009).

2.2.3 DETECÇÃO DE SINAIS COM DIVERSIDADE DE POLARIZAÇÃO

Como observado nas equações (13) e (14), as fotocorrentes dependem do estado de polarização do sinal e LO. Um mesmo sentido de polarização nas entradas da híbrida é necessário para uma máxima fotocorrente de saída. Para garantir isso, a diversidade de polarização é implementada nos receptores.

Para implementar diversidade de polarização nos receptores, dois detectores em fase e em quadratura (Figura 17) devem ser utilizados, como ilustrado na Figura 18. O uso de divisores de polarização (*polarization beam splitters* – PBS) garante que o sentido de polarização das entradas em cada detector IQ é o mesmo. O PBS divide o sinal de entrada em dois com polarizações ortogonais e potências dependentes do sentido de polarização do sinal de entrada (SEIMETZ, 2009).

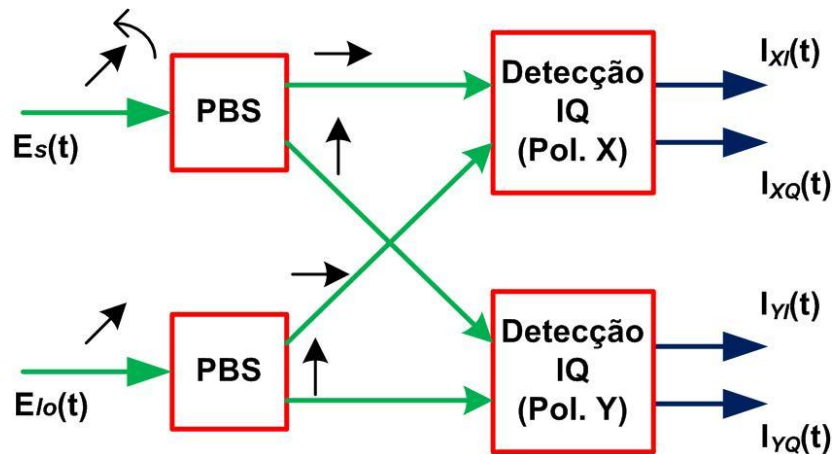


Figura 18: Configuração de um receptor com diversidade de polarização.

O estado de polarização do oscilador local deve ser 45° , garantindo uma potência igual em cada saída do PBS. Já o estado de polarização do sinal modulado varia e é dependente do canal de comunicação, portanto, os sinais com polarizações X e Y nas saídas do PBS não são os mesmos sinais com polarizações X e Y na transmissão. Algoritmos de demultiplexação de polarização são aplicados nas correntes de saída para separar as polarizações X e Y que estão misturadas.

2.2.4 TRANSMISSÃO ÓPTICA A 100 GB/S

Em março de 2010, a transmissão a 100 Gb/s foi padronizada pelo OIF (*Optical Internetworking Forum*) (OIF, 2010). O formato de modulação utilizado nesse padrão é o Chaveamento em Quadrifase com Polarização Dupla (*dual polarization quadrature phase shift keying* – DP-QPSK), apresentando uma eficiência espectral de 2 bit/s/Hz e largura de banda compatível com a grade DWDM de 50 GHz. O diagrama de blocos de um transmissor DP-QPSK 100 Gb/s é ilustrado na Figura 19.

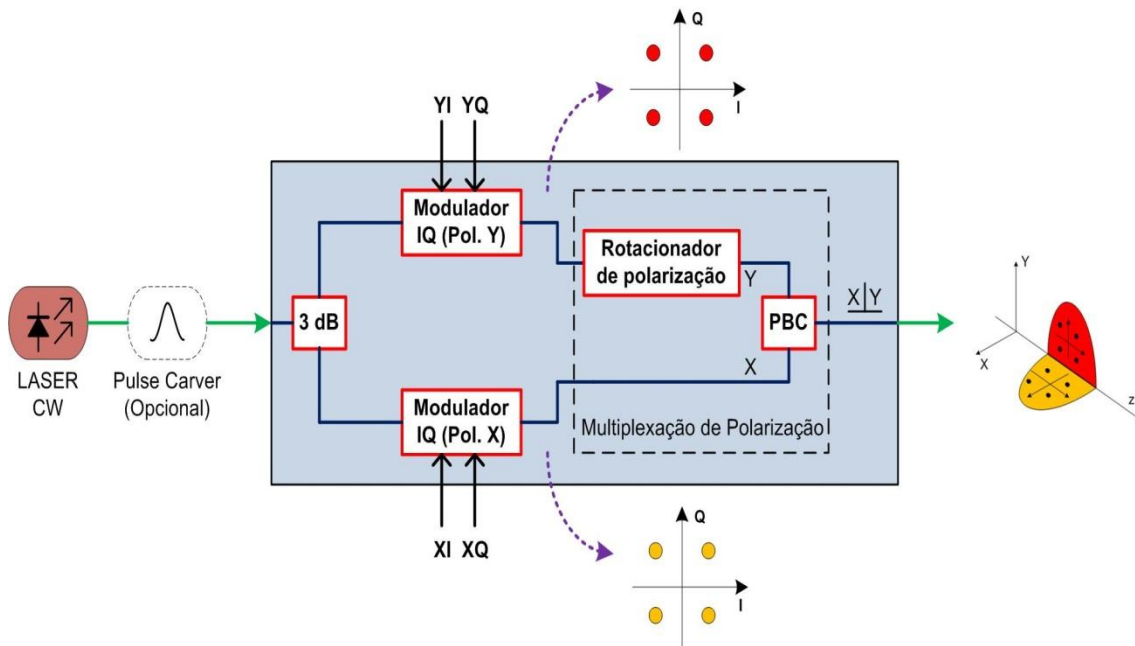


Figura 19: Diagrama esquemático de um transmissor DP-QPSK.

Para uma transmissão em 100 Gb/s, as linhas de dados (XI, XQ, YI e YQ) devem possuir 25 Gb/s cada. Um laser CW atua como portadora e um formador de pulsos (*pulse carver* – PC) opcional é utilizado para gerar pulsos RZ (*return-to-zero*). O sinal óptico da portadora é dividido por um acoplador 3 dB e suas saídas servem como entradas para dois moduladores IQ. Na saída de cada modulador IQ está presente um sinal com formato de modulação QPSK (*quadrature phase shift keying*). Um estágio de multiplexação de polarização é realizado utilizando um rotacionador de polarização e um combinador de polarização (*polarization beam combiner* – PBC). O rotacionador de polarização utilizado gira o estado de polarização do sinal de entrada em 90° de forma que os sinais X e Y tenham polarizações ortogonais e possam ser combinados no PBC sem haver interferência. Após o estágio de multiplexação de polarização é obtido um sinal óptico a 100 Gb/s com uma eficiência espectral de 2 bit/s/Hz e, portanto, ocupando uma banda de 50 GHz compatível com a grade da ITU.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Formatos avançados de modulação para transmissão em altas taxas e com alta eficiência espectral assim como a otimização na alocação de canais em sistemas de

comunicações ópticas são alternativas para suprir a demanda por largura de banda, como explicitado nas seções anteriores.

Redes legadas com transmissão a 10 Gb/s OOK deverão suportar canais no novo padrão de 100 Gb/s DP-QPSK. Esta seção tem como objetivo propor um método de análise para determinar um cenário ótimo de alocação de canais em redes flexíveis com taxas de transmissão a 100 e 10 Gb/s.

3.1 MONTAGEM DE REFERÊNCIA PARA SIMULAÇÕES

Para comparar os diferentes cenários simulados, uma montagem de referência foi realizada utilizando o software *Optiwave OptiSystemTM*. O sistema de referência utilizado nas simulações está ilustrado na Figura 20.

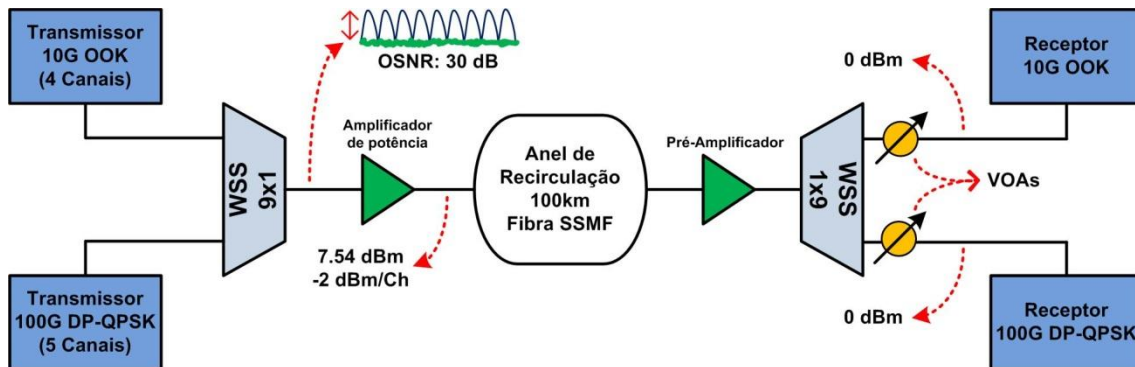


Figura 20: Montagem de referência utilizada nas simulações.

O sistema ilustrado na Figura 20 possui 9 canais, sendo 4 canais modulados a 10 Gb/s com formato de modulação OOK e 5 canais a 100 Gb/s com modulação DP-QPSK, todos com relação sinal-ruído óptica (*optical signal-to-noise ratio* – OSNR) de 30 dB na transmissão. Os canais gerados nos transmissores são multiplexados por uma chave WSS flexível 9x1, em seguida os canais são amplificados por um amplificador de potência para serem transmitidos em um anel de recirculação com 100 km de fibra SSMF. Como a potência desejada por canal é de -2 dBm, nível potência por canal abaixo do limite de não-linearidade, a potência lançada na fibra para 9 canais é de 7,54 dBm. A saída do anel de recirculação é amplificada por um pré-amplificador para aumentar a potência do sinal recebido, selecionado por uma chave WSS flexível 1x9. Uma potência de 0 dBm na recepção é garantida por um atenuador óptico variável (*variable optical attenuator* – VOA).

A utilização do anel de recirculação permite observar o comportamento de enlaces de grandes distâncias, possibilita a avaliação dos fenômenos físicos que mais impactam a transmissão, testes rápidos de esquemas de compensação de dispersão e de protótipos que devem ser instalados ao longo de um enlace, além de utilizar menos equipamentos e componentes, a exemplo, o amplificador óptico. O esquema do anel simulado é ilustrado na Figura 21. Um controle de voltas determina quantas vezes o sinal óptico se propaga pelo anel de recirculação, escolhendo o tamanho total do enlace efetivamente percorrido pelo sinal. No anel de recirculação o sinal óptico se propaga por dois enlaces de fibra SSMF de 50 km, uma chave WSS flexível e três amplificadores de linha ópticos utilizados para compensar as perdas do sistema.

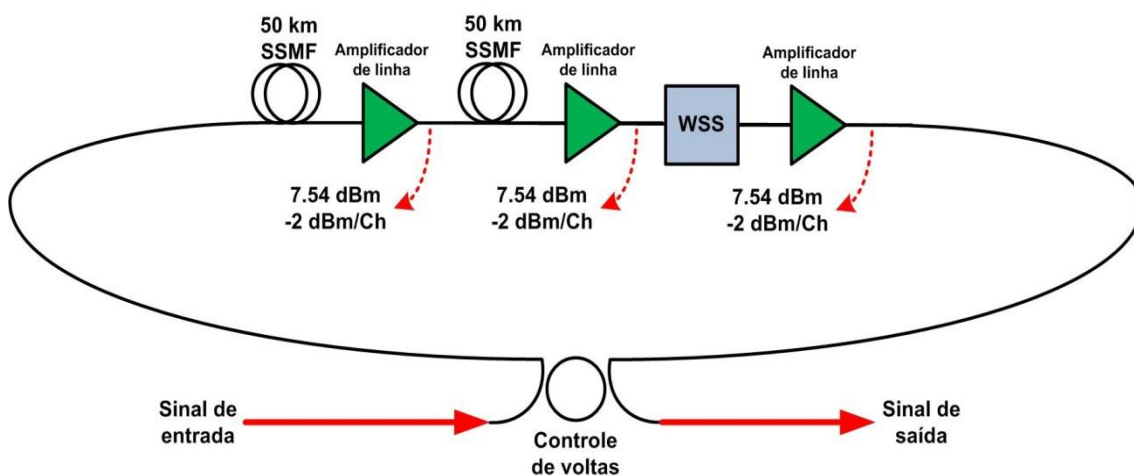


Figura 21: Anel de recirculação utilizado nas simulações.

A Tabela 1 apresenta algumas especificações importantes dos dispositivos utilizados no anel de recirculação ilustrado na Figura 21.

Tabela 1: Especificações dos dispositivos utilizados no anel de recirculação.

Amplificador de Linha		Fibra óptica		WSS flexível	
Potência de saída	7.54 dBm	Padrão	ITU-T G.652	Tipo de filtro	Gaussiano
Ganho	10 dB	Perda	0.2 dB/km	Ordem do filtro	2
Figura de ruído	4.5 dB	Dispersão	16.75 ps/nm/km	Banda do filtro	$N. 12,5$ GHz

3.2 CENÁRIOS SIMULADOS

Diversos cenários de rede foram simulados com o objetivo de comparar os resultados obtidos em cada caso. Para definir os diferentes cenários, os seguintes parâmetros foram variados:

- i. Alocação de canais;
- ii. Espaçamento;
- iii. Banda de guarda;
- iv. Formato de pulso;
- v. Filtragem óptica.

A Figura 22 ilustra os modos de alocação de canais utilizados nas simulações (canais agrupados e intercalados). As Figuras 23-25 e a Tabela 2 apresentam as configurações dos diferentes cenários simulados.

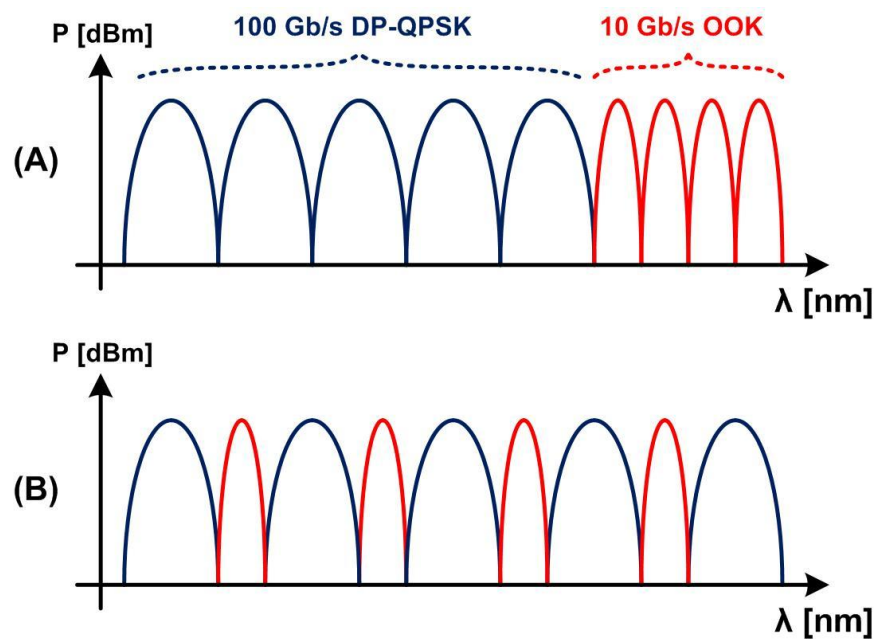


Figura 22: Alocação de canais. (A) Agrupados e (B) Intercalados.

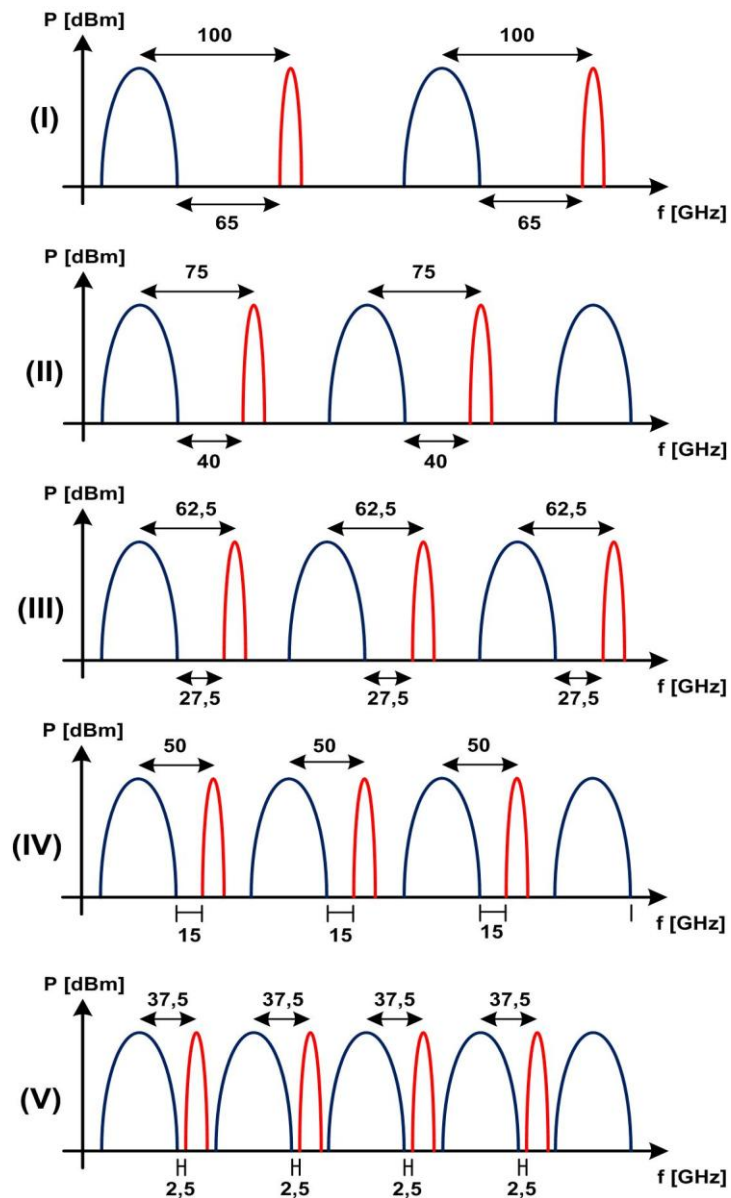


Figura 23: Cenários (I-V) com alocação intercalada (canais de 100 e 10 Gb/s).

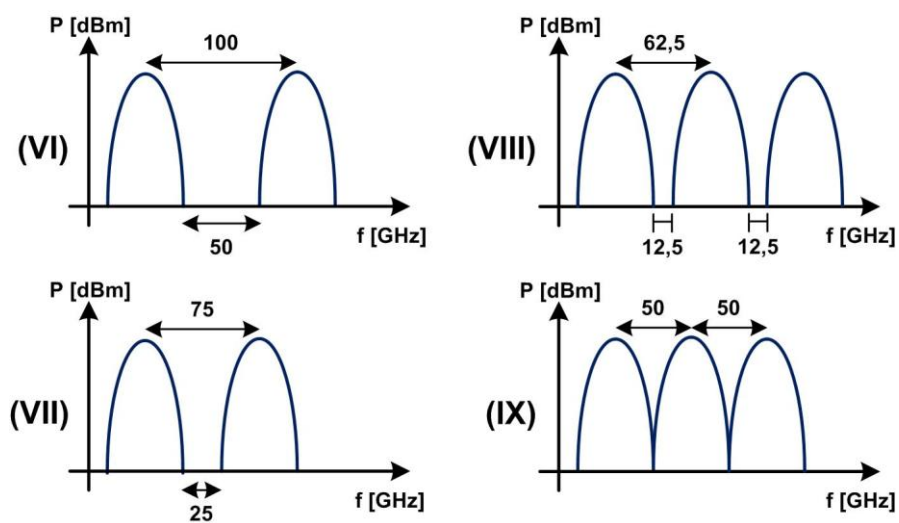


Figura 24: Cenários (VI-IX) com alocação agrupada (canais de 100 Gb/s).

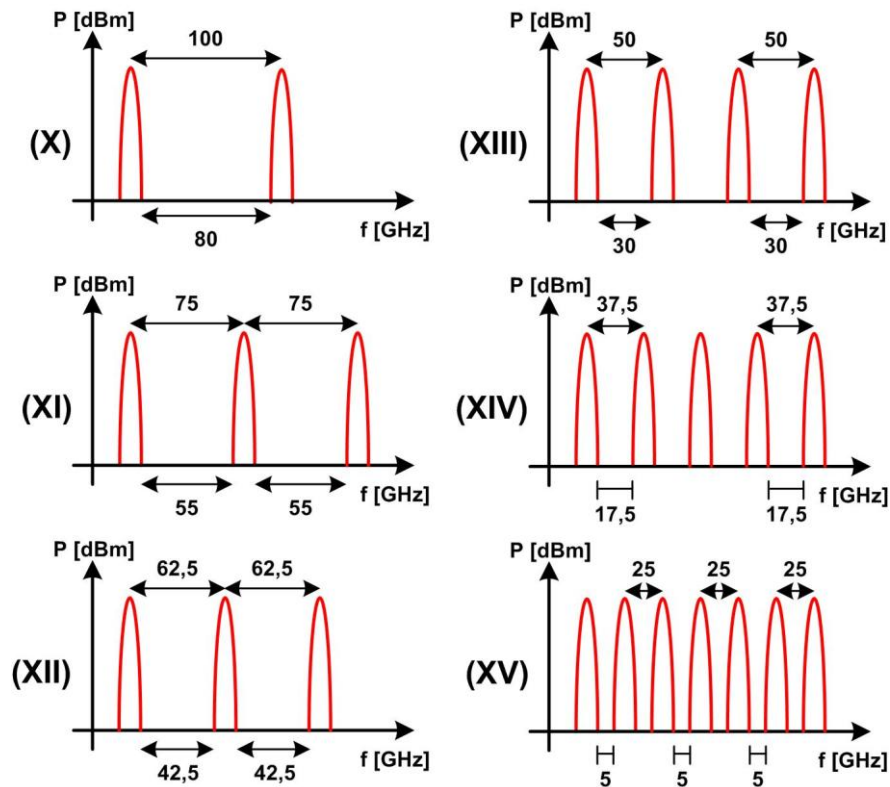


Figura 25: Cenários (X-XV) com alocação agrupada (canais de 10 Gb/s).

Tabela 2: Parâmetros importantes dos cenários simulados.

Cenário	Alocação	Espaçamento [GHz]	Banda de guarda [GHz]	Formato de pulso
1	Intercalados	100	65	NRZ/RZ
2	Intercalados	75	40	NRZ/RZ
3	Intercalados	62,5	27,5	NRZ/RZ
4	Intercalados	50	15	NRZ/RZ
5	Intercalados	37,5	2,5	NRZ/RZ
6	100G Agrupados	100	50	NRZ/RZ
7	100G Agrupados	75	25	NRZ/RZ
8	100G Agrupados	62,5	12,5	NRZ/RZ
9	100G Agrupados	50	0	NRZ/RZ
10	10G Agrupados	100	80	NRZ/RZ
11	10G Agrupados	75	55	NRZ/RZ
12	10G Agrupados	62,5	42,5	NRZ/RZ
13	10G Agrupados	50	30	NRZ/RZ
14	10G Agrupados	37,5	17,5	NRZ/RZ
15	10G Agrupados	25	5	NRZ/RZ

A banda de guarda é definida sabendo que canais DP-QPSK 100 Gb/s e OOK 10 Gb/s possuem largura de banda de 50 e 20 GHz, respectivamente.

O menor espaçamento entre canais foi de 25 GHz, pois é o limite inferior para alocação de banda nas chaves WSS flexíveis disponíveis atualmente no mercado. A Tabela 3 apresenta as larguras de banda dos filtros nas chaves WSS utilizadas em cada cenário simulado.

Tabela 3: Filtragem óptica na chave WSS para os cenários simulados.

Cenário	Filtragem (100 Gb/s) [GHz]	Filtragem (10 Gb/s) [GHz]
1	100	100
2	75	75
3	62,5	62,5
4	50	50
5	50	25
6	100	-
7	75	-
8	62,5	-
9	50	-
10	-	100
11	-	75
12	-	62,5
13	-	50
14	-	37,5
15	-	25

Para todos os cenários descritos nas Tabelas 2 e 3 foi determinado um número máximo de voltas no anel de recirculação igual a 30, representando um enlace total de 3000 km.

3.3 MÉTODO DE ANÁLISE

Para cada cenário simulado será determinada uma curva de desempenho em termos de taxa de erro de bit (*bit error rate* – BER) por razão sinal-ruído óptica (*optical signal-to-noise ratio* – OSNR) na entrada do receptor. Essas curvas serão comparadas com curvas de BER por OSNR realizadas em *back-to-back* (BTB), situação onde o transmissor é diretamente ligado ao receptor, de forma a determinar a penalidade de OSNR para um valor de BER pré-definido. Nesse trabalho, a BER de referência é obtida na última volta para cada cenário simulado.

A penalidade de OSNR diz o quanto o sistema penalizou o sinal. A Figura 26 ilustra como é obtida a penalidade de OSNR para um cenário de rede genérico.

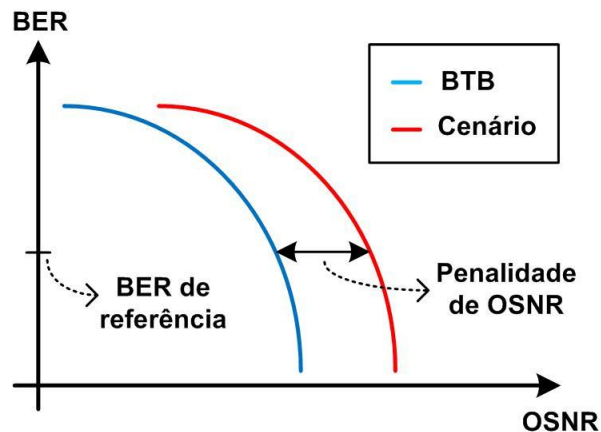


Figura 26: Penalidade de OSNR.

Diferentes fatores penalizam sinais em redes ópticas flexíveis, tais como degradação da OSNR, interferência entre canais adjacentes (*crosstalk*) (Figura 27) e o efeito da filtragem óptica resultante com o cascadeamento de filtros (Figura 28). É observado que o efeito do *crosstalk* não está presente nos cenários apresentados aqui.

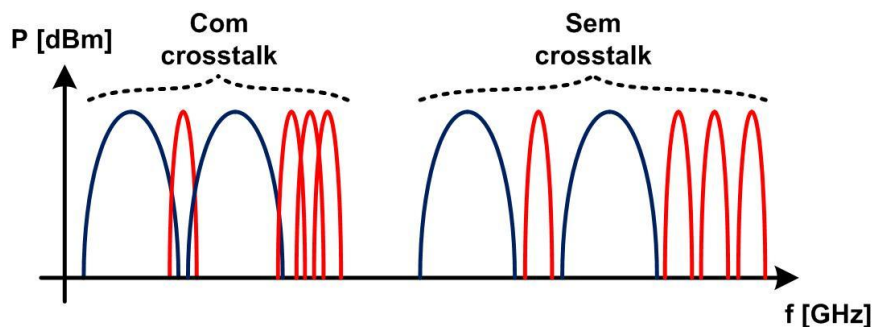


Figura 27: Interferência entre canais adjacentes (*crosstalk*).

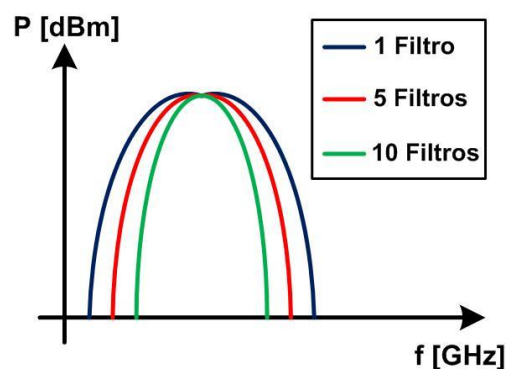


Figura 28: Filtragem óptica resultante do cascadeamento de filtros.

Os filtros das chaves WSS simuladas neste trabalho possuem função de transferência dada por:

$$H(f) = \alpha \cdot e^{-\ln(\sqrt{2}) \left[\frac{f-f_c}{B/2} \right]^{2N}}, \quad (15)$$

onde α é a perda de inserção, f_c é a frequência central de operação, B é a largura de banda e N é a ordem do filtro. A Tabela 4 apresenta as larguras de banda resultantes do cascadeamento de filtros com função de transferência dada pela equação (15).

Tabela 4: Larguras de banda resultantes do cascadeamento de filtros ópticos.

Banda do Filtro [GHz]	15 Filtros Cascadeados [GHz]	30 Filtros Cascadeados [GHz]
100	50,74	42,66
75	38,05	31,95
62,5	31,71	26,66
50	25,37	21,33
37,5	19,03	16,00
25	12,68	10,66

Da Tabela 4 pode-se observar que a largura de banda resultante após 30 filtros cascadeados é reduzida para menos da metade em todos os casos. O afinamento da banda de passagem resulta na interferência entre símbolos (IES) e, portanto, é um parâmetro crítico no projeto de redes ópticas flexíveis.

Na próxima seção serão apresentados os resultados obtidos assim como uma análise detalhada, levando em consideração todos os fatores citados anteriormente.

4 RESULTADOS

Como citado anteriormente, as simulações descritas no Capítulo 3 irão fornecer resultados em termos de BER em função da OSNR. A penalidade de OSNR será observada após 30 voltas no anel de recirculação, o equivalente a um enlace total de 3.000 km, para todos os cenários simulados.

Para determinar as penalidades dos sistemas simulados curvas de BER por OSNR em BTB para os diferentes formatos de modulação testados foram realizadas, como ilustram as Figuras 29 e 30.

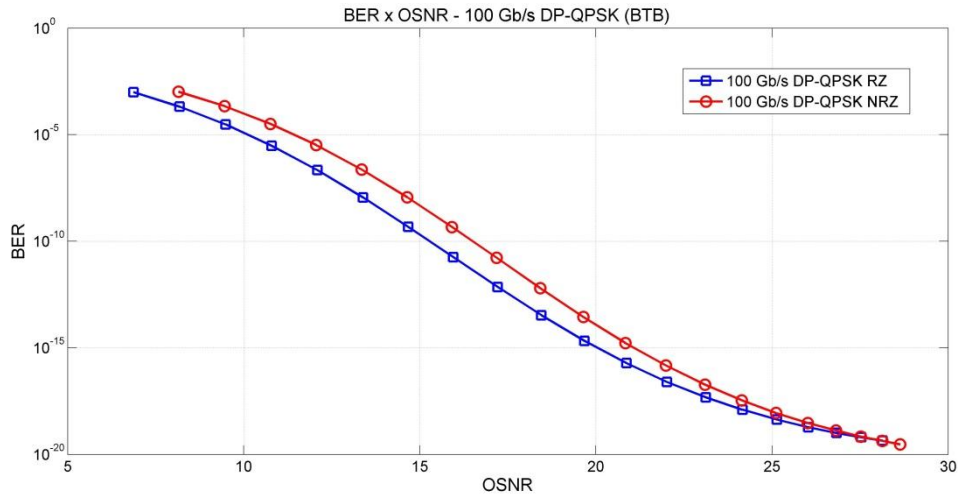


Figura 29: Curva de desempenho em *back-to-back* para transmissão a 100 Gb/s DP-QPSK.

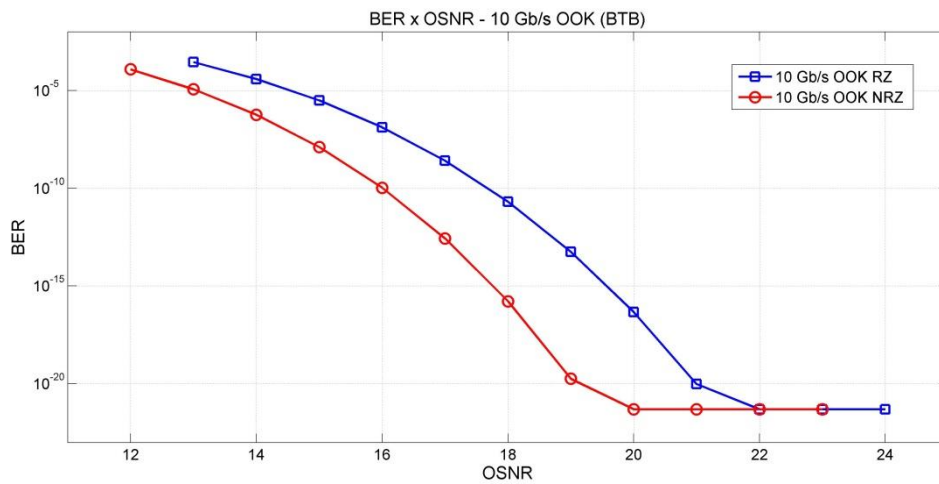


Figura 30: Curva de desempenho em *back-to-back* para transmissão a 10 Gb/s OOK.

As seções 4.1 a 4.5 apresentam e analisam os resultados dos cenários simulados.

4.1 CANAIS INTERCALADOS: ANÁLISE EM 100 GB/S DP-QPSK

Cenários com canais intercalados foram simulados e as curvas de desempenho com canais de 100G DP-QPSK testados são apresentadas nas Figuras 31 e 32, com formatos de pulso NRZ e RZ, respectivamente.

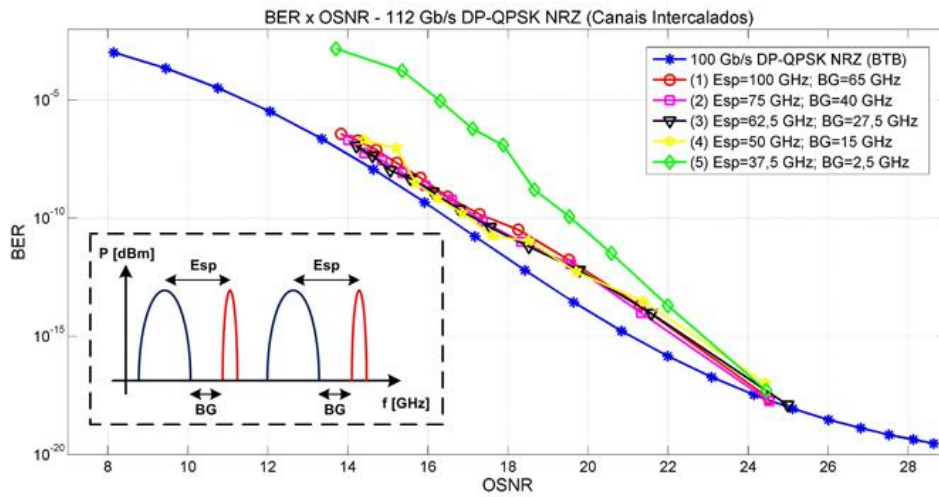


Figura 31: Curvas de BER x OSNR para canais 100G DP-QPSK NRZ com alocação intercalada.

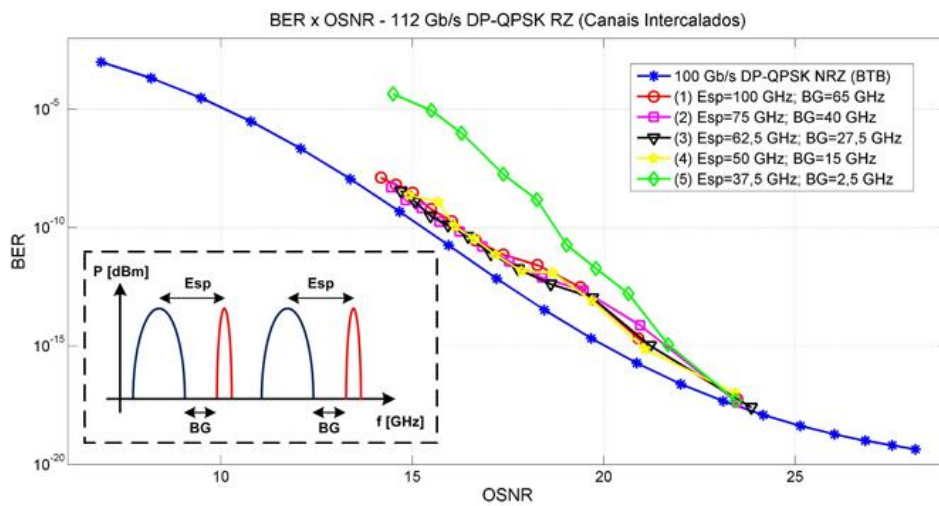


Figura 32: Curvas de BER x OSNR para canais 100G DP-QPSK RZ com alocação intercalada.

A partir das curvas obtidas (Figuras 31 e 32), penalidades de OSNR para os cenários simulados foram determinadas e são apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Penalidades de OSNR para canais de 100G DP-QPSK NRZ com alocação intercalada.

Cenário	Espaçamento	Banda de guarda	Banda do filtro	Penalidade de OSNR
1	100 GHz	65 GHz	100 GHz	0,72 dB
2	75 GHz	40 GHz	75 GHz	0,60 dB
3	62,5 GHz	27,5 GHz	62,5 GHz	0,55 dB
4	50 GHz	15 GHz	50 GHz	1,00 dB
5	37,5 GHz	2,5 GHz	50 GHz	5,28 dB

Tabela 6: Penalidades de OSNR para canais de 100G DP-QPSK RZ com alocação intercalada.

Cenário	Espaçamento	Banda de guarda	Banda do filtro	Penalidade de OSNR
1	100 GHz	65 GHz	100 GHz	0,83 dB
2	75 GHz	40 GHz	75 GHz	0,74 dB
3	62,5 GHz	27,5 GHz	62,5 GHz	0,85 dB
4	50 GHz	15 GHz	50 GHz	0,89 dB
5	37,5 GHz	2,5 GHz	50 GHz	5,83 dB

Para todos os cenários exceto o 5, as penalidades podem ser consideradas desprezíveis. No cenário 5 o espaçamento entre os canais é de 37,5 GHz e uma banda de guarda de apenas 2,5 GHz existe entre canais de 100 e 10 Gb/s. Nesse cenário foram observadas as maiores penalidades de OSNR para os canais de 100 Gb/s, de 5,28 e 5,83 dB para sinais NRZ e RZ, respectivamente.

4.2 CANAIS INTERCALADOS: ANÁLISE EM 10 GB/S OOK

Resultados para 10 Gb/s OOK NRZ e RZ em cenários com modo de alocação intercalada também foram obtidos. As Figuras 33 e 34 ilustram as curvas de desempenho para essas situações e a Tabelas 7 e 8 apresentam as penalidades em todos os cenários.

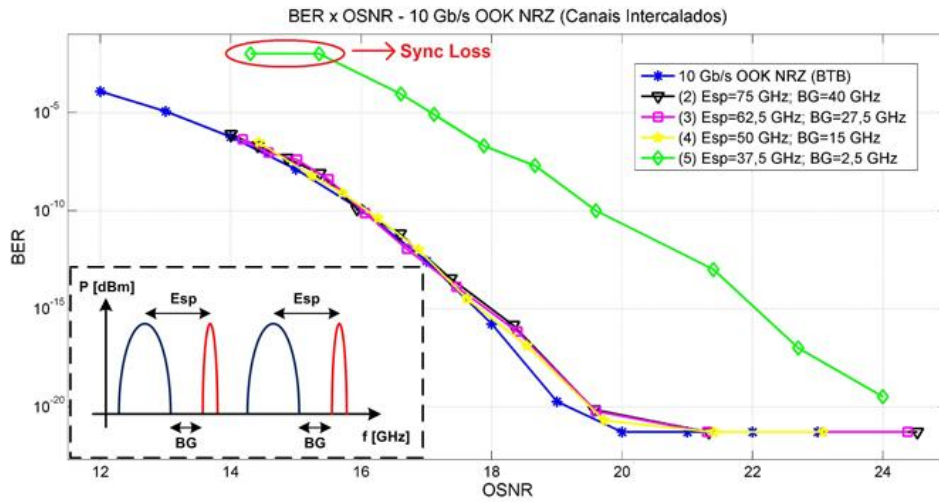


Figura 33: Curvas de BER x OSNR para canais 10G OOK NRZ com alocação intercalada.

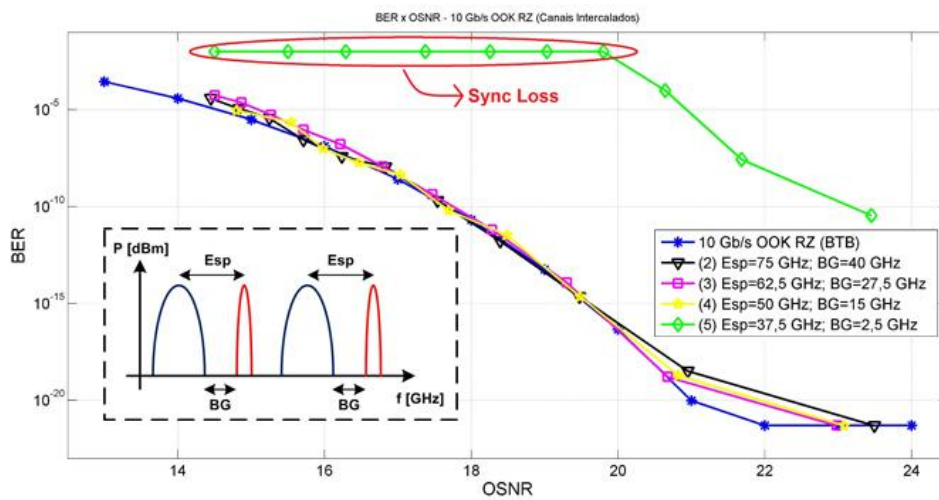


Figura 34: Curvas de BER x OSNR para canais 10G OOK RZ com alocação intercalada.

Tabela 7: Penalidades de OSNR para canais de 10G OOK NRZ com alocação intercalada.

Cenário	Espaçamento	Banda de guarda	Banda do filtro	Penalidade de OSNR
2	75 GHz	40 GHz	75 GHz	0,10 dB
3	62,5 GHz	27,5 GHz	62,5 GHz	0,11 dB
4	50 GHz	15 GHz	50 GHz	0,27 dB
5	37,5 GHz	2,5 GHz	25 GHz	4,50 dB

Tabela 8: Penalidades de OSNR para canais de 10G OOK RZ com alocação intercalada.

Cenário	Espaçamento	Banda de guarda	Banda do filtro	Penalidade de OSNR
2	75 GHz	40 GHz	75 GHz	0,45 dB
3	62,5 GHz	27,5 GHz	62,5 GHz	0,70 dB
4	50 GHz	15 GHz	50 GHz	0,30 dB
5	37,5 GHz	2,5 GHz	25 GHz	7,15 dB

Apenas o cenário 5, que possui espaçamento de 37,5 GHz e banda de guarda de 2,5 GHz, apresentou penalidades consideráveis aos canais de 10 Gb/s. Canais com formatos de pulso NRZ apresentaram uma penalidade de OSNR de 4,5 dB, enquanto canais RZ apresentaram penalidade de 7,15 dB. Canais RZ apresentaram maior penalidade, pois possuem maior ocupação espectral.

4.3 CANAIS AGRUPADOS: ANÁLISE EM 100 GB/S DP-QPSK

As Figuras 35 e 36 apresentam curvas de BER por OSNR para canais de 100 Gb/s DP-QPSK com formatos de pulso NRZ e RZ, respectivamente, em cenários com modo de alocação agrupada.

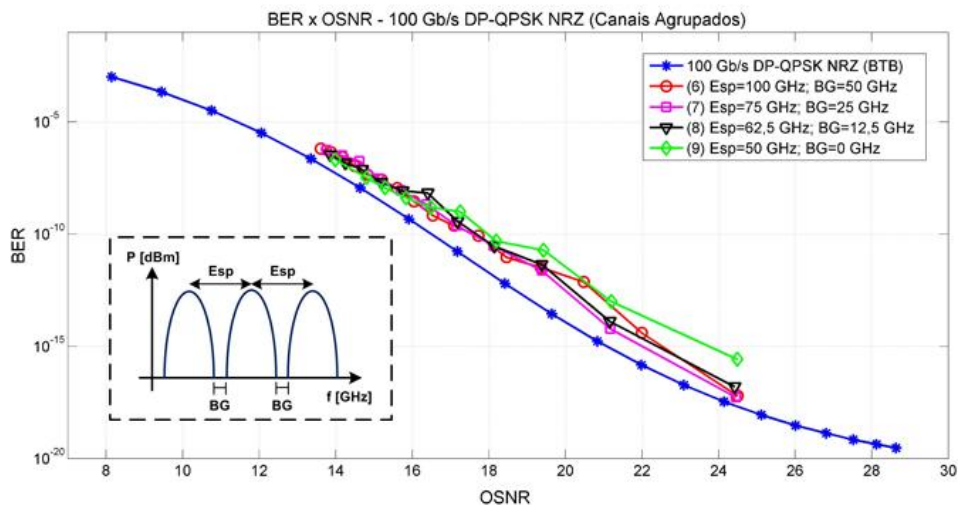


Figura 35: Curvas de BER x OSNR para canais 100G DP-QPSK NRZ com alocação agrupada.

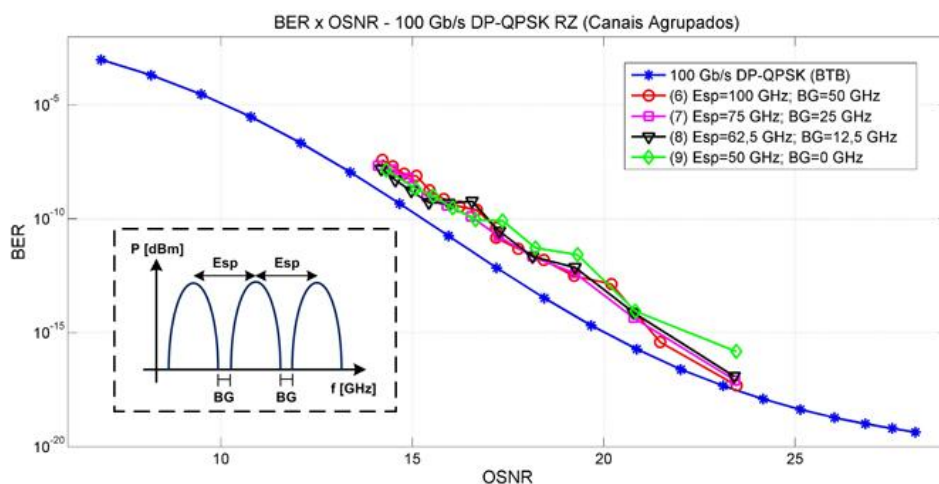


Figura 36: Curvas de BER x OSNR para canais 100G DP-QPSK RZ com alocação agrupada.

As Tabelas 9 e 10 apresentam os valores de penalidade de OSNR na última volta para os cenários apresentados nas Figuras 35 e 36.

Tabela 9: Penalidades de OSNR para canais de 100G DP-QPSK NRZ com alocação agrupada.

Cenário	Espaçamento	Banda de guarda	Banda do filtro	Penalidade de OSNR
6	100 GHz	50 GHz	100 GHz	0,75 dB
7	75 GHz	25 GHz	75 GHz	0,60 dB
8	62,5 GHz	12,5 GHz	62,5 GHz	0,70 dB
9	50 GHz	0 GHz	50 GHz	0,84 dB

Tabela 10: Penalidades de OSNR para canais de 100G DP-QPSK RZ com alocação agrupada.

Cenário	Espaçamento	Banda de guarda	Banda do filtro	Penalidade de OSNR
6	100 GHz	50 GHz	100 GHz	1,05 dB
7	75 GHz	25 GHz	75 GHz	1,00 dB
8	62,5 GHz	12,5 GHz	62,5 GHz	0,95 dB
9	50 GHz	0 GHz	50 GHz	1,04 dB

Podemos observar que os canais de 100 Gb/s DP-QPSK com modo de alocação agrupada apresentam o mesmo desempenho quando o espaçamento, banda de guarda e largura de banda dos filtros são reduzidos. As penalidades apresentadas nas Tabelas 9 e 10 podem ser consideradas desprezíveis.

4.4 CANAIS AGRUPADOS: ANÁLISE EM 10 GB/S OOK

Curvas de desempenho em termos de BER por OSNR para canais 10 Gb/s OOK em cenários com modo de alocação agrupada são ilustradas nas Figuras 37 e 38.

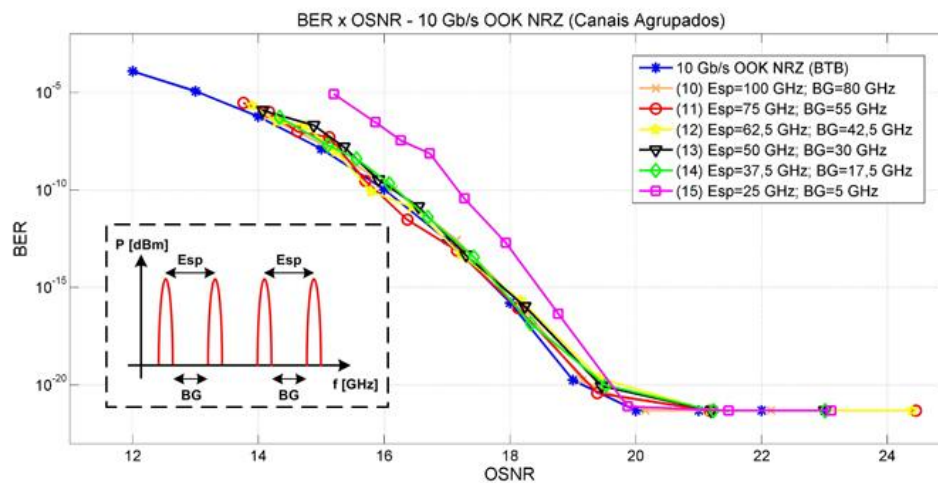


Figura 37: Curvas de BER x OSNR para canais 10G OOK NRZ com alocação agrupada.

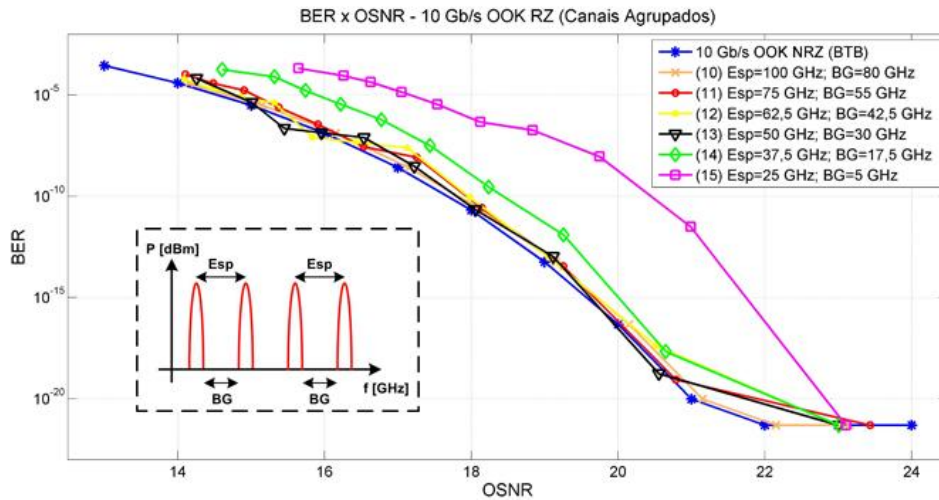


Figura 38: Curvas de BER x OSNR para canais 10G OOK RZ com alocação agrupada.

Penalidades de OSNR para os cenários simulados com transmissão 10 Gb/s OOK e modo de alocação agrupada são apresentadas nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11: Penalidades de OSNR para canais de 10G OOK NRZ com alocação agrupada.

Cenário	Espaçamento	Banda de guarda	Banda do filtro	Penalidade de OSNR
10	100 GHz	80 GHz	100 GHz	0,15 dB
11	75 GHz	55 GHz	75 GHz	0,30 dB
12	62,5 GHz	42,5 GHz	62,5 GHz	0,34 dB
13	50 GHz	30 GHz	50 GHz	0,31 dB
14	37,5 GHz	17,5 GHz	37,5 GHz	0,31 dB
15	25 GHz	5 GHz	25 GHz	2,10 dB

Tabela 12: Penalidades de OSNR para canais de 10G OOK RZ com alocação agrupada.

Cenário	Espaçamento	Banda de guarda	Banda do filtro	Penalidade de OSNR
10	100 GHz	80 GHz	100 GHz	0,15 dB
11	75 GHz	55 GHz	75 GHz	0,60 dB
12	62,5 GHz	42,5 GHz	62,5 GHz	0,31 dB
13	50 GHz	30 GHz	50 GHz	0,53 dB
14	37,5 GHz	17,5 GHz	37,5 GHz	1,30 dB
15	25 GHz	5 GHz	25 GHz	2,49 dB

Os resultados das Tabelas 11 e 12 apresentam penalidades apenas quando o espaçamento e largura de banda dos filtros são reduzidos aos valores mínimos possíveis. Penalidades consideráveis ocorrem apenas quando o espaçamento e largura de banda dos filtros são de 25 GHz, para canais NRZ e RZ.

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em geral, canais com formato de pulsos RZ apresentaram uma maior penalidade em relação aos canais com pulsos NRZ. Esse efeito era esperado, pois a ocupação espectral dos canais RZ é maior, tornando-os mais susceptíveis aos da filtragem óptica.

Também foi observado que canais com modo de alocação intercalada apresentaram maiores penalidades em relação aos canais com alocação agrupada quando houve redução da banda de guarda. Foi observado que canais de 10 Gb/s são mais penalizados quando seus vizinhos são canais de 100 Gb/s e o mesmo acontece para canais de 100 Gb/s com vizinhos de 10 Gb/s. Esses resultados mostram que apesar de não existir o *crosstalk* direto nos cenários simulados, existe algum tipo de interferência entre canais com diferentes formatos de modulação.

A partir dos resultados obtidos nas seções anteriores, fluxogramas para alocação de canais de 10 e 100 Gb/s em redes ópticas flexíveis foram criados e estão ilustrados nas Figuras 39 e 40. Seguindo esses fluxogramas podemos determinar o espaçamento, banda de guarda e largura de banda dos filtros para cada canal da rede, de forma a otimizar a ocupação do espectro óptico sem penalizar o sistema.

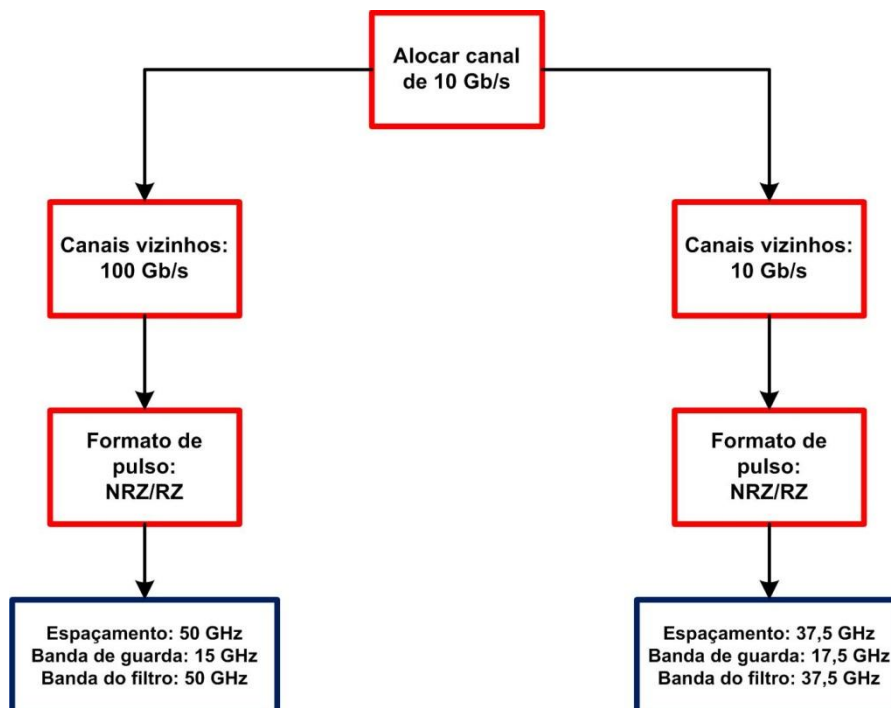


Figura 39: Fluxograma para alocação de canais de 10 Gb/s em redes ópticas flexíveis.

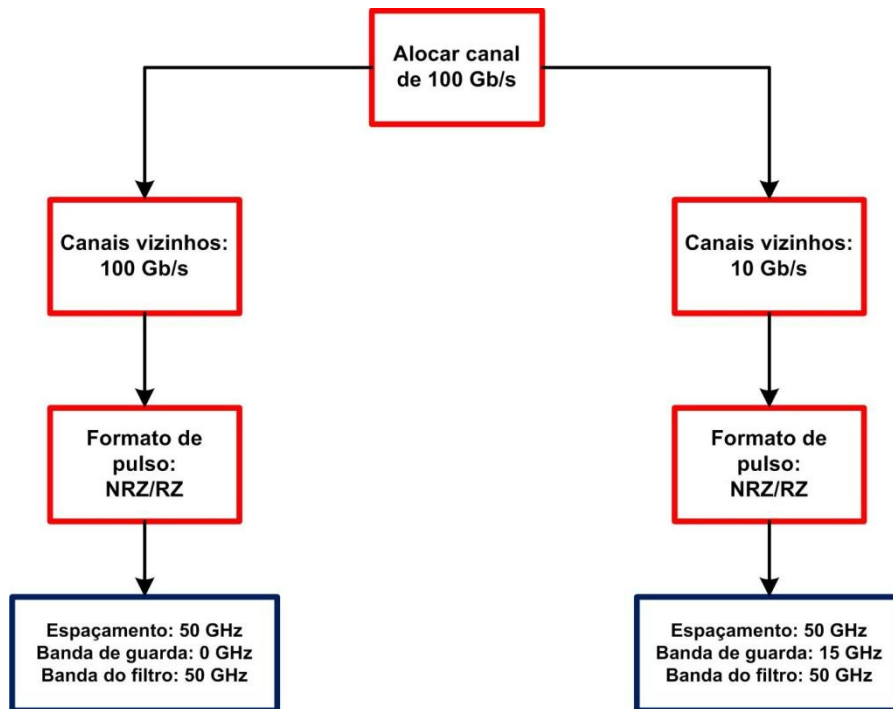


Figura 40: Fluxograma para alocação de canais de 100 Gb/s em redes ópticas flexíveis.

A partir dos resultados obtidos, foi observado que a melhor maneira de alocar canais em redes flexíveis com taxas de transmissão de 10 e 100 Gb/s é:

- i. Agrupar canais de 100 Gb/s com espaçamento e largura de banda dos filtros de 50 GHz e sem banda de guarda;
- ii. Agrupar canais de 10 Gb/s com espaçamento e largura de banda dos filtros de 37,5 GHz e banda de guarda de 17,5 GHz;
- iii. Quando canais com diferentes taxas de transmissão forem vizinhos, aplicar espaçamento de 50 GHz e banda de guarda de 15 GHz.

A Figura 41 ilustra o cenário de rede descrito acima, onde canais com diferentes taxas de transmissão podem trafegar em uma rede flexível sem sofrer penalidades.

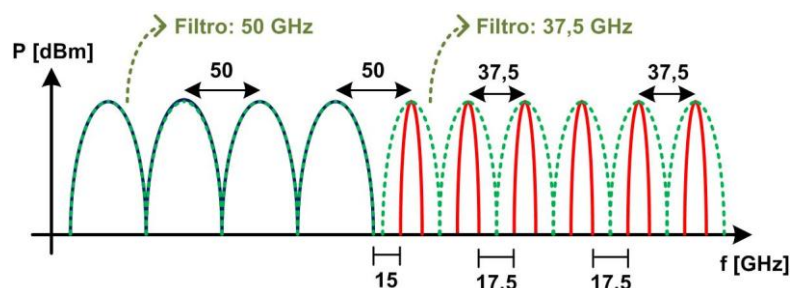


Figura 41: Cenário de rede flexível com canais de 10 e 100 Gb/s sem penalidades.

5 CONCLUSÃO

Diferentes fatores como espaçamento entre canais, banda de guarda, largura de banda dos filtros ópticos utilizados e taxas de transmissão utilizadas no sistema, são determinantes no projeto de redes ópticas flexíveis, cujo objetivo é otimizar a ocupação espectral dos sistemas ópticos atuais sem inserir penalidades consideráveis. Os principais efeitos degradantes desses sistemas são o *crosstalk* entre canais adjacentes, o afunilamento da banda de passagem devido ao cascadeamento de filtros e a degradação da OSNR.

Inicialmente uma revisão sobre a evolução dos sistemas ópticos e dos ROADMs foi realizada, seguida de uma introdução aos sistemas ópticos com detecção coerente, temas necessários para o entendimento do trabalho realizado.

Neste trabalho, foram simulados em *software* diversos cenários de redes ópticas flexíveis. Utilizando a penalidade de OSNR como método de comparação entre os diferentes cenários, foram determinados algoritmos de alocação de canais e um cenário ótimo para transmissão em redes ópticas flexíveis com taxas de transmissão de 10 e 100 Gb/s.

Objetivos de trabalhos futuros são validar experimentalmente os resultados obtidos em simulação, utilizar diferentes perfis de filtros ópticos nas chaves WSS e introduzir cenários com *crosstalk* entre canais vizinhos.

BIBLIOGRAFIA

AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.

AMAYA, N. et al. **Experimental Demonstration of a Gridless Multi-granular Optical Network Supporting Flexible Spectrum Switching**. OFC. Los Angeles: [s.n.]. 2011.

AMAYA, N. et al. **Gridless Optical Networking Field Trial: Flexible Spectrum Switching, Defragmentation and Transport of 10G/40G/100G/555G over 620-km Field Fiber**. ECOC. Geneva: [s.n.]. 2011.

COLLINGS, B. C.; ROORDA, P. ROADM-Based Networks. In: ZYSKIND, J.; SRIVASTAVA, A. **Optically Amplified WDM Networks**. San Diego: Academic Press, 2011. p. 23-45.

FARIAS, J. E. P. et al. **Optical Signal Degradation in a ROADMs-based DWDM Ring Network**. LAOP. Recife: [s.n.]. 2010.

OIF. **Implementation Agreement for Integrated Polarization Multiplexed Quadrature Modulated Transmitters**. [S.l.]. 2010.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. **Optical Networks - A practical perspective**. San Diego: Academic Press, 2002.

SEIMETZ, M. **High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission**. Berlin: Springer, 2009.

SINSKY, J. H.; WINZER, P. J. 100G Optical Communications. **IEEE Microwave Magazine**, 2009. 44-57.

TROWBRIDGE, S. J. **Scaling the P802.3ba and G.709 Architectures**. Joint ITU-T/IEEE Workshop on The Future of Ethernet Transport. Geneva: [s.n.]. 2010.

VERIZON. **Verizon Business High Speed Exchange Connectivity**. Verizon Communications Inc. [S.l.], p. 2. 2010.

WANG, X. et al. **Blocking Performance in Dynamic Flexible Grid Optical Networks - What is the Ideal Spectrum Granularity?** ECOC. Geneva: [s.n.]. 2011.

GLOSSÁRIO

AWG	–	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>
BER	–	<i>Bit Error Rate</i>
BTB	–	<i>Back-to-Back</i>
CW	–	<i>Continuous Wave</i>
DCE	–	<i>Dynamic Channel Equalization</i>
DEMUX-T	–	<i>Monitored Demultiplexer</i>
DP-QPSK	–	<i>Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying</i>
DSF	–	<i>Dispersion Shifted Fiber</i>
DWDM	–	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	–	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
HDTV	–	<i>High Definition Television</i>
IQM	–	<i>In-phase/Quadrature Modulator</i>
ITU	–	<i>International Telecommunications Union</i>
LCoS	–	<i>Liquid Crystal on Silicon</i>
LO	–	<i>Local Oscillator</i>
MEMS	–	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MZM	–	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
NRZ	–	<i>Non-Return-to-Zero</i>
OADM	–	<i>Optical Add/Drop Multiplexer</i>
OCM	–	<i>Optical Channel Monitoring</i>
OIF	–	<i>Optical Internetworking Forum</i>
OOK	–	<i>On-Off Keying</i>
OSNR	–	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
PBC	–	<i>Polarization Beam Combiner</i>
PBS	–	<i>Polarization Beam Splitter</i>
PC	–	<i>Pulse Carver</i>
PDS	–	<i>Processamento Digital de Sinais</i>
PLC	–	<i>Planar Lightwave Circuits</i>
PM	–	<i>Phase Modulator</i>
QPSK	–	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>

ROADM	–	<i>Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer</i>
ROAM	–	<i>Reconfigurable Optical Add Module</i>
RZ	–	<i>Return-to-Zero</i>
SDH	–	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SLM	–	<i>Single Longitudinal Mode</i>
SONET	–	<i>Synchronous Optical Networking</i>
SSMF	–	<i>Standard Single-Mode Fibers</i>
VOA	–	<i>Variable Optical Attenuator</i>
VOD	–	<i>Video On Demand</i>
VoIP	–	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WB	–	<i>Wavelength Blocker</i>
WDM	–	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WSS	–	<i>Wavelength Selective Switch</i>