



Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica – DEE

DEMONSTRAÇÃO EXPERIMENTAL E SIMULADA DA TRANSMISSÃO WDM COERENTE PARA REDES DE ACESSO

Autor: Thyago Monteiro Sá Pinto
Professor orientador: José Ewerton P. de Farias
Co-Orientador: Jacklyn Dias Reis

Trabalho de Conclusão de Curso
Apresentado à Coordenação de
Engenharia Elétrica da Universi-
dade Federal de Campina Grande
(UFCG), como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Campina Grande, outubro de 2014

THYAGO MONTEIRO SÁ PINTO

DEMONSTRAÇÃO EXPERIMENTAL E SIMULADA DA TRANSMISSÃO
WDM COERENTE PARA REDES DE ACESSO

Trabalho de Conclusão de Curso
Apresentado à Coordenação de
Engenharia Elétrica da Universi-
dade Federal de Campina Grande
(UFCG), como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Area de concentração: Telecomunicações

Orientador: José Ewerton P. de Farias

Co-orientador: Jacklyn Dias Reis

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2014

THYAGO MONTEIRO SÁ PINTO

DEMONSTRAÇÃO EXPERIMENTAL E SIMULADA DA TRANSMISSÃO
WDM COERENTE PARA REDES DE ACESSO

Trabalho de Conclusão de Curso
Apresentado à Coordenação de
Engenharia Elétrica da Universi-
dade Federal de Campina Grande
(UFCG), como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Area de concentração: Telecomunicações

Aprovado em 24 de setembro de 2014

Professor Edmar Candeia Gurjão, Dr.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

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

Jacklyn Dias Reis, Dr.
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
Co-Orientador, CPqD

*Dedicado à minha mãe, com todo
meu carinho.*

Agradecimentos

Chegar ao final dessa jornada não foi fácil. E falo isso não apenas pelos anos que passei na universidade, pois este caminho se estende a muito além disso e vai até o tempo em que eu imaginava uma forma de mudar a realidade a minha volta. Porém, não cheguei até aqui sozinho e ao longo dessa estrada, algumas pessoas foram fundamentais para que eu alcançasse esse momento.

Começo agradecendo a minha mãe, que me ensinou mais do que educação, me ensinou a ser forte, a perseverar sempre que preciso e não me deixar deter por qualquer dificuldade ou limitação. Sua força e coragem sempre me inspiraram, de modo que esse resultado é tão seu quanto meu.

Ao meu irmão, meu muito obrigado por todos os abraços forçados, as alegrias compartilhadas e por todas as vezes que me fez sorrir com sua atitude carinhosa, sua ingenuidade de criança e seu coração tão puro.

Aos meus orientadores, Jozilene de Souza (Pibic junior), Selma Maria Araujo (Monitoria), Benedito Antonio Luciano (tutor do PET Elétrica), Jacklyn Dias Reis (CPqD) e José Ewerton Pombo de Farias (TCC), meu agradecimento por acreditarem no meu trabalho, me moldado como profissional e compartilhado tantas lições valiosas. Em especial, quero agradecer ao professor Edmar Candeia Gurjão (tutor do PET Elétrica 2005-2012) por todos os momentos de aprendizado e que vão muito além de orientações técnicas.

Aos meus amigos do Programa de Educação Tutorial e os que cultivei ao longo da graduação, em especial aos do período 8.2, meu muito obrigado pelo carinho, as conversas e os momentos que passamos juntos. Saibam que toda vez que cada um de vocês recebeu o meu sorriso, era a manifestação do meu coração ao encontrar almas tão generosas. Citar nomes parece injusto, mas não poderia deixar de destacar algumas pessoas que conseguiram se tornar parte fundamental da minha história. Thamiles, minha parceira de lutas e risadas, Fideles, grande amigo que mesmo distante sempre se manteve perto, Ramon, que adicionei a minha família como primo, Rafael Wesley, cuja sinceridade sempre me serviu de exemplo e a Felipe Lira, meu grande amigo sempre disposto a me escutar e me desafiar. A todos vocês, meu muito obrigado.

Quero também ressaltar minha gratidão e admiração ao Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) e a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), dos quais tenho muito orgulho. Ao longo dos últimos anos, tive a oportunidade de aprender com os melhores e quero agradecer aos meus professores pela paciência e humildade com que sempre se portaram. Levo grandes exemplos dos profissionais desta instituição.

Parte da realização deste trabalho só se fez possível devido a infra-estrutura cedida pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) e quero registrar meu agradecimento a empresa por ter me permitido a utilização do espaço e equipamentos para as finalidades deste resultado.

Por fim, agradeço a Deus por cada dia de vida e por ter estado comigo até aqui. Diferentemente das teorias expostas neste texto, fé é algo inexato, passível de interpretações e significados próprios. A minha fé esteve presente em cada trecho desta estrada, me guiando, me fortalecendo e me dando a certeza de que esse momento chegaria.

Resumo

O crescimento do tráfego de dados nos sistemas de comunicações, em especial no segmento acesso, tem guiado diversas pesquisas no sentido de evitar o esgotamento de capacidade da rede. Esse aumento acelerado se deve, entre outros fatores, à mudança do perfil do usuário moderno, flexibilidade do acesso, demanda por maiores taxas de transmissão, popularização do serviço de banda larga e a exigência de melhor qualidade de transmissão em serviços de *broadcast* (difusão simultânea) e *streaming* (fluxo contínuo via Internet). Neste momento existem algumas tecnologias de redes de acesso que atendem a exigência de altas taxas de transmissão com maior eficiência na utilização do espectro. Neste trabalho realizou-se a validação experimental e simulada de uma arquitetura WDM Coerente QPSK de 16 canais com transmissão *dowstream* e alcance de 50 km, tendo vista sua aplicação em redes de acesso. A avaliação de desempenho referenciou-se nos critérios de BER, EVM e SNR.

Abstract

The growth of data traffic in communication systems, especially in the access segment, has guided several research studies in order to avoid depletion of network capacity. This fast increase is due, among other factors, the change of the modern user profile, flexibility of access, demand for higher transmission rates, the popularization of broadband service and the demand for better quality of transmission in broadcast and streaming services. In this moment, there are some possibilities in access networks that meet the demand of high data traffic with better spectral efficiency. This work was carried out both at the experimental and simulated levels considering a WDM architecture with 16 Coherent QPSK channels with downstream transmission with 50 km reach. This work was carried out focusing on access network application, e.g. passive optical networks. Performance evaluation was based on BER, EVM and SNR measurements.

Lista de Figuras

1.1	Arquitetura WDM	2
1.2	Arquitetura WDM para Redes Metropolitanas e <i>Wireless</i> [5]	2
1.3	Contexto histórico do aumento de capacidade em redes ópticas [4]	3
2.1	Espectro ADSL	6
2.2	Configurações FFTx	7
2.3	Arquitetura WDM Composta [15]	8
2.4	Arquitetura WDM Heterogênea [15]	9
3.1	Sistema de comunicações com detecção coerente	11
3.2	Perfil de ganho e perdas laser DFB [1]	13
3.3	Perfil de ganho e perdas Laser com cavidade acoplada [1]	13
3.4	Interferômetro [14]	14
3.5	(a)Modular de fase(PM) (b)Modulador de Mach-Zehnder (MZM) [19]	14
3.6	Modulador óptico IQ [19]	15
3.7	Estrutura da fibra óptica [1]	16
3.8	Perfil de perdas na fibra óptica [1]	17
3.9	Mistura de quatro ondas [9]	18
3.10	Amplificador dopado a íons de erbio (EDFA)	19
3.11	Perfil de ganho do amplificador EDFA para uma fibra de 15km e laser de bombeio com $\lambda = 980nm$ [14]	19
3.12	Princípio de detecção coerente [19]	21
3.13	Configuração do Receptor Coerente (RXn)	22
4.1	Constelação QPSK	25
4.2	Diagrama de olho	25
5.1	Estrutura do Simulador	27
5.2	Espectro de entrada [WDM 16 canais QPSK $SNR \sim 15dB$]	28
5.3	Espectro de saída [WDM 16 canais QPSK $SNR \sim 15dB$]	28
5.4	Constelação [WDM 16 canais QPSK $SNR \sim 15dB$]	28
5.5	Caracterização BERx SRN	28
5.6	BER por canal WDM para uma SNR de 14,5dB	29
5.7	Espectro de entrada [WDM 16 canais QPSK SSF Espaçamento 15GHz $SNR = 14,5dB$]	29
5.8	Espectro de saída[WDM 16 canais QPSK SSF Espaçamento 15GHz $SNR = 14,5dB$]	29
5.9	Constelação [WDM 16 canais QPSK SSF Espaçamento 15GHz e $SNR = 14,5dB$]	30
5.10	Constelação [WDM 16 canais, QPSK, SSF, Espaçamento 3,125 GHz, Largura de linha 100 kHz, potência no laser -1 dBm]	31

5.11	Constelação [WDM 16 canais, QPSK, SSF, Espaçamento 3,125 GHz, Largura de linha 1 kHz, potência no laser -1 dBm]	31
5.12	Espectro de entrada [WDM 16 canais, 16QAM, SSF, Espaçamento 3,125 GHz, Largura de linha 1 kHz, potência no laser -5 dBm]	31
5.13	Espectro de saída [WDM 16 canais, 16QAM, SSF, Espaçamento 3,125 GHz, Largura de linha 1 kHz, potência no laser -5 dBm]	31
5.14	Constelação [WDM 16 canais, 16QAM, SSF, Espaçamento 3.125 GHz, Largura de linha 1kHz, potência no laser $-5dBm$]	31
6.1	Implementação Laboratorial do Sistema 16 canais WDM-QPSK	33
6.2	Caracterização transmissão 16 Canais WDM-QPSK	33
6.3	Espectro recebido 16 Canais WDM-QPSK	34
6.4	Configuração para avaliação da potência de lançamento	34
6.5	Avaliação com 50km de fibra	35
6.6	Avaliação em B2B	35
6.7	Avaliação potência de lançamento WDM 16 canais 16QAM	36

Lista de Siglas

AON: *Active Optical Network* (Rede Óptica Ativa)
BER: *Bit Error Rate* (Taxa de Erro de Bit)
CWDM: *Coarse Wavelength Division Multiplexing*
DWDM: Dense WDM
EDFA: *Erbium Doped Fiber Amplifier* (Amplificadores Ópticos de Fibra Dopada a Érbio)
EPON: Ethernet PON
FTTB: *fiber-to-the-building* (Fibra até o Condomínio)
FTTC: *fiber-to-the-curb* (Fibra até o meio-flo)
FTTH: *fiber-to-the-home* (Fibra até a Residência)
FTTN: *fiber-to-the-node* (Fibra até a Vizinhaça)
GPON: Gigabit PON
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU-T: *International Telecommunication Union*
WAN: *Wide-Area Networks*
NRZ: Codificação tipo Non-Return to Zero
OLT: *Optical Line Terminal* (Terminal de Linha Óptica)
ONT: *Optical Network Terminal* (Terminal de Rede Óptica), em português URA
ONU: *Optical Network Unit* (Unidade de Rede Óptica), em português URA
PON: *Passive Optical Network* (Redes Óptica Passiva)
RoF: *Radio Over Fiber*
RZ: Codificação tipo Return to Zero
SER: *Symbol Error Rate* (Taxa de Erro de Símbolo)
TCP: *Transport Control Protocol*
TDM: *Time Division Multiplexing* (Multiplexação por Divisão no Tempo)
UDP: *User Data Protocol*
URA: Unidade de Rede de Acesso
MAN: *Metro-Area Network* (Rede Metropolitana)

Capítulo 1

Introdução

O crescimento do número de clientes dos serviços de comunicações combinado com a mudança do perfil do usuário moderno, que demanda maiores taxas de transmissão, alta qualidade em serviços de *broadcast* e *streaming* e mobilidade de acesso, tem levado a um aumento acelerado do tráfego de dados na rede. De acordo com Korotky (2012), atualmente esse crescimento mundial é de 38% (duplicando a cada 26 meses), e em 2022 este número deve estar em torno de 24% (duplicando a cada 38 meses). Em função disso, desenvolvimentos tecnológicos para redes de próxima geração, que evitem o esgotamento de capacidade, utilizem o espectro mais eficientemente, acompanhem as tendências e ao mesmo tempo atendam critérios de legado/retro-compatibilidade e custo tem sido amplamente discutidos .

A aplicação da técnica de Multiplexação por Divisão de Comprimento de onda (WDM, do inglês, *Wavelength Division Multiplexing*) em redes ópticas passivas (PON -Passive Optical Network) é certamente uma forte candidata no segmento acesso de próxima geração, para o problema em questão. Em um sistema WDM temos um comprimento de onda associado a cada usuário, como ilustrado na figura 1.1. Em cada terminal de linha óptico (OLT-*Optical Line Termination*) são gerados sinais distintos, com frequências simetricamente espaçadas, que são multiplexados e enviados através do canal até a Unidade de Rede de Acesso (URA). Então, os sinais são demultiplexados até chegarem ao usuário final. Cada um deste, por sua vez, envia sinais em um comprimento de onda específico, sendo estes demultiplexados e levados a OLT. De volta à central, os sinais passam por um circulador que separa os respectivos sinais *downstream* - da central para o usuário- dos sinais *upstream*- do usuário para central. Assim, outro demultiplexador separa os comprimentos de onda, direcionado para os receptores. Essas operações de roteamento de dados são realizadas pelo *Arrayed Waveguide Grating* (AWG) que intercala o sinal óptico de entrada e o de saída, de acordo com o comprimento de onda.

Dessa forma, cada usuário pode trocar informações a qualquer instante, sem compartilhamento de janelas temporais, diminuindo os problemas de gerenciamento da rede. Para lidar com a limitação de banda dedicada exclusiva ponto-a-ponto, algumas alternativas tem sido investigadas, como a alocação dinâmica de banda (DWBA), na qual a determinação do comprimento de onda para URA é realizada automaticamente mediante a análise das características de tráfego em cada OLT (KANEKO, 2014). Outra opção proposta por Chang (2012) é a utilização de uma unidade de controle de rede (NUC-*Network Unit Controller*), como um dispositivo intermediário entre o demultiplexador e o canal, permitindo um modo de proteção, detecção e correção de falhas no sistema e nos dispositivos.

Em conjunto com redes metropolitanas, a utilização de WDM-PON no segmento acesso está inserida após o Multiplexador Óptico Reconfigurável (ROADM- *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*), conforme organizado na figura 1.2. No núcleo, vários destes estão conectados e suportam a configuração, agindo como uma interface agregadora- desagregadora que transmite e recebe o sinal para um nó remoto (RN). Os serviços principais envolvem acesso a residências

ou empresas. Para fazer uso da interface *wireless* é necessário utilizar Rádio sobre Fibra (RoF) que provê aumento da capacidade, cobertura e mobilidade (PINTO, 2012).

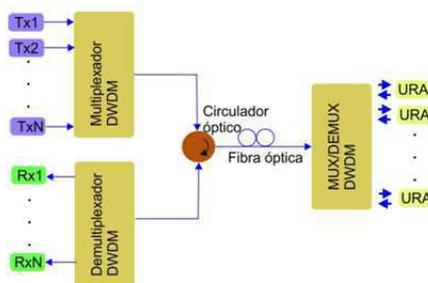


Figura 1.1: Arquitetura WDM

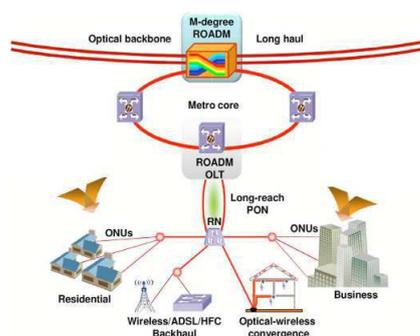


Figura 1.2: Arquitetura WDM para Redes Metropolitanas e *Wireless* [5]

Embora a tecnologia WDM esteja consolidada e apresente vantagens como alta largura de banda e qualidade do serviço para os usuários assim como baixas perdas em comparação com outras arquiteturas similares, seu formato convencional ainda apresenta-se ineficiente em relação a utilização plena da capacidade do canal fibra óptica, mesmo atendendo ao problema de demanda para a próxima geração de redes ópticas de acesso (NG-OAN). Neste sentido, têm-se a utilização de WDM Ultra Denso (UDWDM- *Ultra Dense Wavelength-Division Multiplexing*) combinada com técnicas de modulação de alta ordem como Modulação em fase e quadratura M-ária (M-QAM) e Modulação por Deslocamento de Fase M-ária (M-PSK).

A utilização de UDWDM e modulação de alta ordem cumprem dois importantes papéis na solução dos problemas apresentados. O uso de UDWDM permite uma melhor utilização do espectro por trabalhar com menor espaçamento entre canais em relação ao WDM convencional. Já a modulação de alta ordem proporciona maiores taxas de transmissão, com a mesma banda utilizada. Porém, ambas as tecnologias trazem considerações adicionais, pois são limitados pela interferência entre canais, interferência inter-simbólica, sensibilidade e efeitos de não linearidades. Além disso, esse esquema de transmissão requer uma recepção mais sofisticada do que a detecção direta, trazendo a necessidade de um oscilador local no receptor. Entre os ganhos da recepção coerente estão: alta largura de banda ajustável nas URA's, melhoria na sensibilidade do receptor, e compensação física de perdas (REIS, 2012), porém sua utilização implica em um custo adicional ao sistema de recepção, pois requer a presença de uma fonte em cada URA.

Nota-se que esse conjunto de considerações implica em uma solução de compromisso que envolve aumento do número de usuários, taxas de transmissão e eficiência espectral versus custo e complexidade, tópicos que serão discutidos e analisados neste trabalho.

1.1 Exposição do problema, motivação e objetivos

O desafio exposto aqui se refere ao aumento de capacidade, definida pelo produto distância \times taxa de transmissão. A questão é que esses parâmetros são antagônicos, de modo que o aumento do alcance exige a diminuição da taxa de transmissão e o contrário também acontece. Opta-se, então, por maximizar a relação produto de ambas, estabelecendo-se o valor ótimo. Em termos históricos, o desenvolvimento de algumas tecnologias surgiram com esta finalidade, fato destacado na figura 1.3. Entre elas a técnica WDM passou a se apresentar vantajosa após a consolidação dos Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio (EDFA), visto que estes proporcionam um ganho amplo e que embarca uma quantidade significativa de canais.

Em termos de atualidade, a questão a ser avaliada é qual o próximo passo a ser tomado em direção ao aumento de capacidade. Diversas linhas de pesquisa estão sendo desenvolvidas em técnicas de alocação de espectro e sua utilização de forma dinâmica, mas ainda não se tem uma resposta definitiva para o problema em questão. As direções mais consolidadas levam no sentido de utilização de transmissão em dupla polarização (modos transversais elétrico e magnético), esquemas avançados (M-ários) e melhoria das técnicas de processamento digital de sinais que agem no receptor no sentido de solucionar problemas de equalização, estimação de fase e frequência, correção de relógio ou até problemas de não-linearidades. Por sua vez, essas alternativas apresentam suas próprias limitações, uma delas a demanda de maior sensibilidade no receptor, de forma que a recepção coerente se mostra como a melhor possibilidade em termos de combinação dessas técnicas.

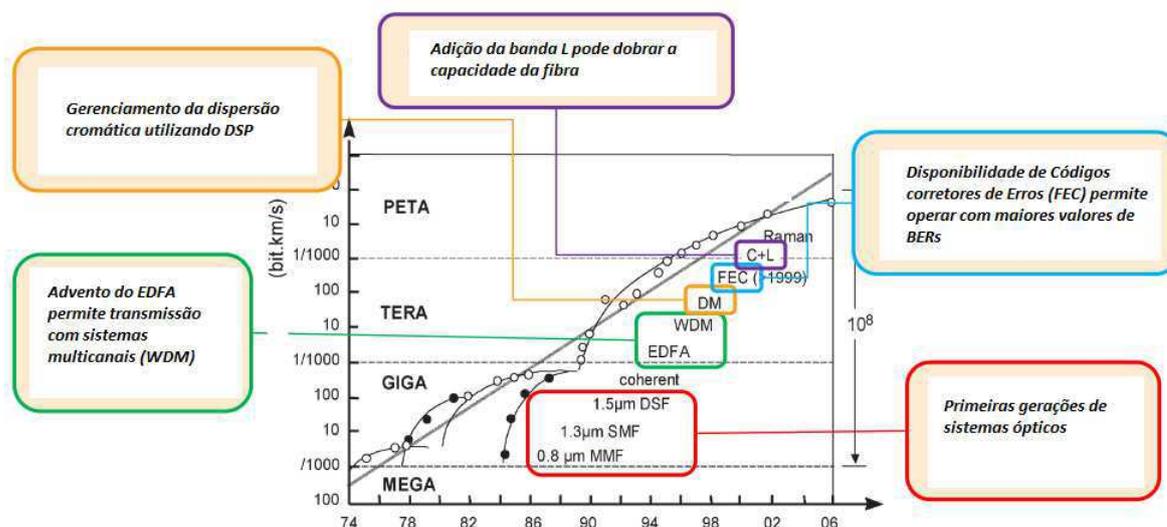


Figura 1.3: Contexto histórico do aumento de capacidade em redes ópticas [4]

No âmbito de redes de acesso, a tecnologia WDM é vista como uma alternativa para sistemas de próxima geração. A transmissão pode ser comprometida por efeitos não-lineares como auto-modulação de fase (SPM) e interferência entre canais (XPM) quando opera-se com altas potências de lançamento, porém baixos valores destas não viabilizam a identificação adequada do sinal recebido. Dessa forma, sistemas WDM exigem um compromisso delicado entre estes parâmetros: espaçamento entre canais, potência de lançamento, taxa de erro e OSNR.

Neste sentido, os principais objetivos no desenvolvimento deste trabalho são:

- Analisar o desempenho de sistemas WDM Coerentes de próxima geração em aplicações para redes de acesso;

- Explorar o funcionamento dos principais dispositivos incluídos em um sistema de transmissão com recepção coerente;
- Avaliar os principais aspectos que comprometem a transmissão em um sistema WDM;

1.2 Metodologia

A metodologia empregada na execução deste trabalho é baseada nas seguintes etapas:

- **Etapa 1: Estudo dos componentes de sistemas ópticos, técnicas de modulação digitais, modulação de alta ordem e arquiteturas WDM Coerentes**

Formação inicial objetivando a familiarização com os aspectos técnicos da rede óptica e da arquitetura em análise.

- **Etapa 2: Simulação de Arquiteturas WDM Coerente**

Simulação de arquiteturas com a tecnologia WDM, utilizando o *software Optical Simulator*, desenvolvido pelo CPqD. Análise e considerações em relação ao desempenho dos sistemas, assim como da otimização em termos de maiores taxas de transmissão, maiores distâncias e maior imunidade a distorção, entre outros critérios.

- **Etapa 3: Implementação laboratorial de um sistema WDM Coerente**

Validação dos resultados simulados por meio da montagem do sistema em ambiente laboratorial e comparação dos resultados obtidos com os da etapa anterior.

- **Etapa 4: Registro dos resultados**

Escrita do relatório do final, revisão e posterior defesa das atividades desenvolvidas.

1.3 Contexto de execução do trabalho

Este trabalho de conclusão de curso (TCC) foi desenvolvido pelo aluno Thyago Monteiro Sá Pinto sob orientação do Prof. Dr. José Ewerton Farias e do pesquisador Dr. Jacklyn Dias Reis, no âmbito do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), no qual o autor foi estagiário. O CPqD possui o maior programa de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações da América Latina, desenvolvendo pesquisas em termos de estado da arte e realizando a ponte entre o que é desenvolvido no contexto universitário e a empregabilidade industrial.

1.4 Organização do texto

Este documento está estruturado em cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

- Capítulo 2: contextualização de sistemas de transmissão para Redes de Acesso, tecnologia WDM Coerente e suas arquiteturas, em termos de sistemas de próxima geração;
- Capítulo 3: detalhamento dos componentes envolvidos no sistema de transmissão coerente, passando pelo transmissor, canal, receptor e o processamento digital dos sinais.
- Capítulo 4: figuras de mérito na avaliação de sistemas de transmissão óptica.
- Capítulo 5: apresentação e avaliação de sistemas simulados WDM Coerente;

- Capítulo 6: apresentação e avaliação dos resultados laboratoriais do sistema WDM Coerente implementado;
- Capítulo 7: considerações finais.

Capítulo 2

Redes de Acesso WDM

2.1 Redes de Acesso

A definição de rede de acesso engloba a interface que conecta os provedores de serviços, central de comutação CO (*Central Office*) aos usuários residenciais e industriais, localizando-se na etapa final da hierarquia de transmissão Grande Área- Rede Metropolitana - Redes locais. O atendimento a esse setor foi primeiramente dominado pelas conexões discadas usando *modems* para comunicação digital e depois pela transmissão digital de dados via rede de telefonia (ADSL-*Asymmetric Digital Subscriber Line*). Neste caso, o espectro é utilizado pelo uso de multiplexação por divisão de frequência (FDM), dividindo a banda passante em zonas reservadas para transmissão de voz e sinais no sentido rede-usuários e vice-versa, conforme observado na figura 2.1. Porém, mesmo com a evolução da tecnologia para os padrões ADSL2 e ADSL2+, os valores de alcance e taxas de transmissão limitam sua aplicação como alternativa para a suprir a crescente demanda de acesso de próxima geração.

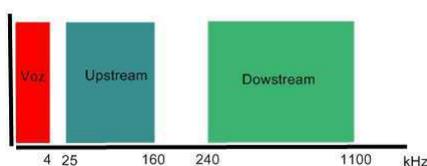


Figura 2.1: Espectro ADSL

Neste sentido, a utilização de Redes Ópticas Passivas se mostra como uma possibilidade. Constituída de elementos que não precisam de alimentação em potência, diferentemente das redes ópticas ativas, PON traz as vantagens dos sistemas ópticos como imunidade a interferência eletromagnética e alta largura de banda, e são classificadas dependendo da penetração na rede de acordo com a terminologia FTTx, na qual o x representa o ponto final do acesso: (H)residência, (B) condomínio, (C) meio-fio e (N) nó. Uma representação dessas configurações pode ser observada na figura 2.2. A terminação é um ponto crítico a ser estabelecido, pois embora se considere inviável levar fibra óptica até residência, a utilização até um ponto intermediário (nó ou meio-fio) é vista como uma boa estratégia, permitindo a integração com sistemas híbrido sem fio ou a terminação por meio de cabos coaxiais ou fio de cobre.

A fibra óptica possui uma ampla largura de banda, de forma que o compartilhamento do canal é a melhor alternativa no sentido de utilizar o máximo da sua capacidade. A integração WDM- PON permite a otimização dessa configuração, solucionando problemas de demanda, eficiência e utilização da estrutura. Assim, cada usuário final envia e recebe informações em um

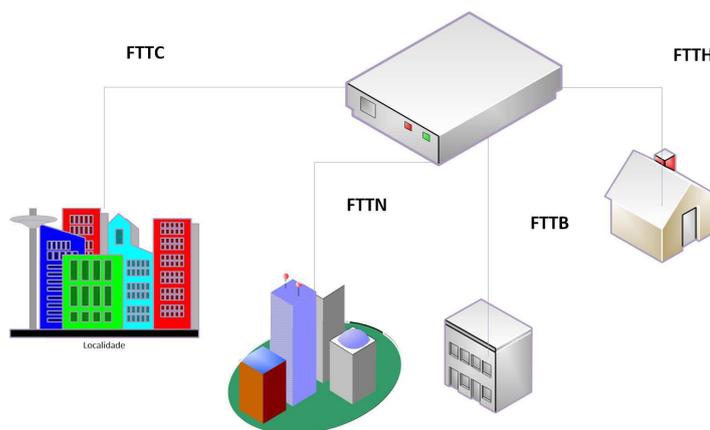


Figura 2.2: Configurações FTTx

comprimento de onda específico, inserido no contexto da rede de acesso, e esta por sua vez se comunica com as redes metropolitanas e de área ampla em camadas superiores.

2.2 WDM

Em um sistema WDM convencional, cada usuário é associado a um comprimento de onda específico (λ), conforme evidenciado na figura 1.1. Sua estrutura é composta dos seguintes elementos:

- Transmissor: responsável pela geração dos dados e modulação;
- Multiplexador: converte os diversos sinais de entrada em um raio único a ser transmitido pela fibra. Se a transmissão for bidirecional, opera de forma reversa, desmembrando o sinal em suas componentes espectrais. Pode ser um Multiplexador reconfigurável (ROADM) ou um circulador óptico AWG (*Arrayed Waveguide Grating*).
- Pré-Amplificação: estágio que provê potência de lançamento adequada para que o sinal seja recebido no receptor. Para o caso de multicanaís, a amplificação é realizada ao grupo.
- Demultiplexador: converte o sinal de entrada em suas componentes e repassa ao receptor coerente;
- Receptor Coerente: com o oscilador local (LO) sintonizado em comprimento de onda especificado, cada cliente ou ONU recebe a informação enviada por um transmissor específico naquele comprimento de onda. Parte da potência do LO pode ser utilizada na transmissão de sinais no sentido clientes- central de comutação, conforme reforçado por Chang (2009).

De acordo com isso, o sistema WDM apresenta algumas vantagens em relação a sistema não multiplexados, pois além do não compartilhamento de janelas temporais, como ocorre na tecnologia de Multiplexação por Divisão de Tempo (TDM), sua utilização também traz outros aspectos:

- Capacidade flexível: sua estrutura permite aumento da taxa de transmissão;
- Transparência: permite a transmissão de uma grande variedade de sinais em diversos formatos de modulação, e suporta serviços *triple-play* .
- Escalabilidade: a expansão da rede pode ser realizada sem comprometimento estrutural;

- Legado: atende critérios de compatibilidade, permitindo a reutilização de componentes e sistemas já consolidados.

Apesar disso, alguns aspectos devem ser levados em consideração, pois embora a transmissão em fibra de diversos canais minimamente espaçados proporcione maior eficiência espectral e de recursos devido ao fator compartilhamento, a qualidade do sinal recebido pode ser seriamente comprometida por efeitos de dispersão cromática, que ocorre quando os raios propagados chegam com tempos diferentes no estágio final do canal. Isto introduz um ruído de fase no receptor, que pode se compensado na etapa de processamento. Além disso, quanto maior a potência de lançamento, o sinal passa a sofrer não-linearidades como Modulação de fase-cruzada (XPM-*Cross Phase Modulation*) e Mistura de Quatro Ondas (FWM-*Four Wave Mixing*). A primeira ocorre quando as potências nos canais passam a interferir nos adjacentes, impedindo sua identificação, enquanto a segunda é resultado da geração adicional de uma quarta onda, com uma frequência que é a combinação aritmética de outras três transportadas no sistema. Não linearidades são discutidas na seção 3.2. Em termos técnicos, a mitigação de efeitos não-lineares pode ser realizada aumentando-se a area efetiva do núcleo da fibra, porém isso não é prático e geralmente opta-se por algoritmos de compensação na etapa de DSP.

2.3 Arquiteturas WDM

A estrutura convencional de uma arquitetura WDM é organizada conforme visto na figura 1.1, em que utiliza-se a sequência transmissor- mux/demux- canal-demux/mux-receptor. Porém o grande questionamento em torno desta estrutura em redes de acesso recai sobre o custo de utilização de uma fonte de luz em cada ONU. Desse modo, diversas arquiteturas tentando contornar essa demanda são dispostas na literatura e que vão desde a utilização de LEDs como fonte emissora no receptor (BANERJEE, 2005) até a utilização de parte da potência do sinal rede-usuários no envio de sinais em sentido contrário. Porém, essas alterações no arranjo não se apresentam tão vantajosas, pois embora LEDs operem em um espectro amplo, sua utilização provoca o aumento das perdas de potência e alcance reduzido.

Uma alternativa para utilização ampla do meio é o uso de subgrupos em cada canal (Reis, 2012), em uma organização composta por etapas de multiplexação, conforme pode ser observada na figura 2.3, de forma a ter o espectro disposto em agrupamentos.

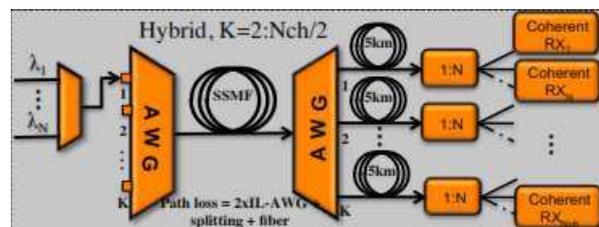


Figura 2.3: Arquitetura WDM Composta [15]

Algumas alternativas exploram a convivência de WDM com tecnologias legado como GPON em uma rede heterogênea tal como na figura 2.4 (REIS, 2012), ou a combinação com tecnologias sem fio, trazendo o conceito de Redes Banda-Larga Óptico-Sem Fio (WOBANs *Wireless Optical Broadband Access Networks*) (LIMA, 2011) que utilizam técnicas como Rádio sobre fibra para prover um *back end* óptico para uma rede *wireless*, combinando a robustez da primeira com a flexibilidade da segunda.

Estas arquiteturas ainda recaem sobre a limitação ponto-a-ponto. Com os receptores trabalhando em frequências definidas para cada usuário, o espectro é utilizado de forma ociosa, pois

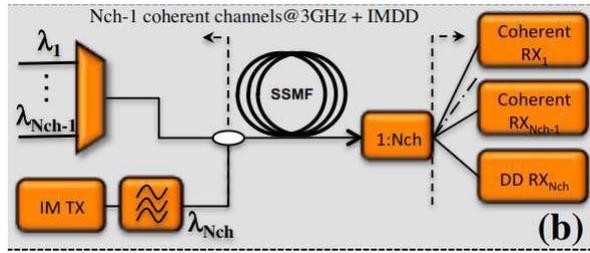


Figura 2.4: Arquitetura WDM Heterogênea [15]

mesmo que o comprimento de onda não esteja sendo utilizado, este não pode ser realocado para outro cliente. A tendência é trabalhar com alocação dinâmica de comprimento de onda (DWA-PON), na qual o receptor utiliza uma fonte sintonizável e que pode ser utilizada para trabalhar em frequências dentro de uma faixa ampla. Alguns resultados dessa técnica são apresentados por Kaneko (2014). A alternativa impulsiona a um WDM-Flexível que combinados a utilização de pulsos com formato Nyquist são considerados o passo seguinte em termos de sistemas WDM de próxima geração (BANERJEE, 2014).

Espera-se que a tecnologia WDM Coerente se torne o próximo nível de evolução estrutural para redes de acesso faixa-larga. Porém, algumas considerações precisam ser feitas antes desse salto, a principal delas é o custo de implementação da rede e que atualmente se mostra vantajosa apenas para enlaces com alto tráfego de dados, como é o caso de redes metropolitanas ou grande area. Especificamente, a fonte de luz é o dispositivo que mais encarece o custo total de implementação do sistema. Um aspecto verificado inclusive na OLT, pois conforme o aumento do número de usuários em um único nó, torna-se impraticável em termos econômicos e de desempenho essa concentração. Entre alternativas neste sentido está o uso de um combo de lasers na OLT, utilizando um dispositivo emissor multi-comprimento de onda, de forma a gerar um conjunto de portadoras deslocadas e alocadas para múltiplos usuários. Outra possibilidade explorada por Reis (2012) é o envio da portadora deslocada junto com o sinal base, sendo aquela filtrada na ONU e utilizada para o transporte de sinais cliente-OLT. Assim, evita-se a necessidade de um oscilador local na ONU e consequentemente diminui-se seu custo.

Atualmente, a perspectiva que se mostra mais concreta é a combinação de WDM Flexível, pulsos com formato Nyquist e alocação dinâmica. Assim, proporciona-se um sistema adaptativo sem limitação ponto-a-ponto, permitindo utilização da capacidade do canal e a entrega de serviço personalizado ao usuário, pois o espectro passa a ser ocupado conforme a demanda do serviço pelo cliente final. Obviamente, isto requer um controle rígido do gerenciamento de tráfego. Resultados abaixo do limite de FEC da utilização de WDM Flexível com transmissão coerente e utilizando o conceito de combo de lasers para alguns formatos de modulação são apresentados por Atai (2014).

Em termos de formato de pulso, Reis (2012) demonstra a significativa melhora da transmissão com pulso Nyquist em comparação com o NRZ, validando uma estratégia de otimização de parâmetros em sistemas coerentes PON. Verificou-se um combate mais efetivo a reflexões de retorno na transmissão bilateral além da mitigação de efeitos de FWM.

2.4 Padrões WDM

A padronização da transmissão de multicanais em sistemas ópticos foi realizada pela União Internacional de Telecomunicações ITU em 1998, na forma do padrão ITU-692 intitulado *Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers* e em que são estabelecidos os espaçamentos padrões de 50 GHz e 100 GHz com frequência central de 193,1 THz. Convencionou-

se que a distância entre canais deveria corresponder a um múltiplo de 25 GHz, um espaçamento mínimo e condizente com a flexibilidade de vários critérios como limitações técnicas de dispositivos, ou protocolos de rede e *software* que suportem a arquitetura.

Uma especificação mais restrita ao WDM surgiu com o padrão G692., voltado para o WDM Denso, e intitulado *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. Definindo espaçamentos de 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz e superiores a 100 GHz, baseadas na frequência central de 193,1 THz. O documento também retrata termos de WDM flexível definindo a motivação da técnica como uma forma de permitir a mistura de múltiplos formatos de modulação e taxas, alocadas no espectro com diferentes larguras de banda otimizadas individualmente para as requisições de cada canal. Além deste, o uso de WDM Amplo é estabelecido pela ITU-694.2 *Coarse Wavelength Division Multiplexing* (CWDM), porém assim como DWDM, suas aplicações são inseridas no contexto de redes metropolitanas.

Capítulo 3

Sistemas de Transmissão com Recepção Coerente

Organizacionalmente, sistemas de transmissão óptica com recepção coerente são compostos pelos seguintes estágios: transmissão, canal (fibra), recepção e processamento digital de sinais (DSP), tal como observado na figura 3.1. Uma portadora óptica, em geral um laser, é modulada por um sinal de informação em banda básica, e este sinal é transmitido pela fibra, passando por alguns trechos de amplificação. No receptor, um oscilador operando na mesma frequência da portadora ou próxima a esta, é rebatido com o sinal modulado, provocando a separação das componentes e consequentemente recuperação da mensagem. Adicionalmente, técnicas de processamento digital são empregadas com o objetivo de compensar efeitos dispersivos ou não linearidades impostos pelo canal. Nas próximas seções, cada uma dessas etapas são detalhadas assim como seus dispositivos representantes.

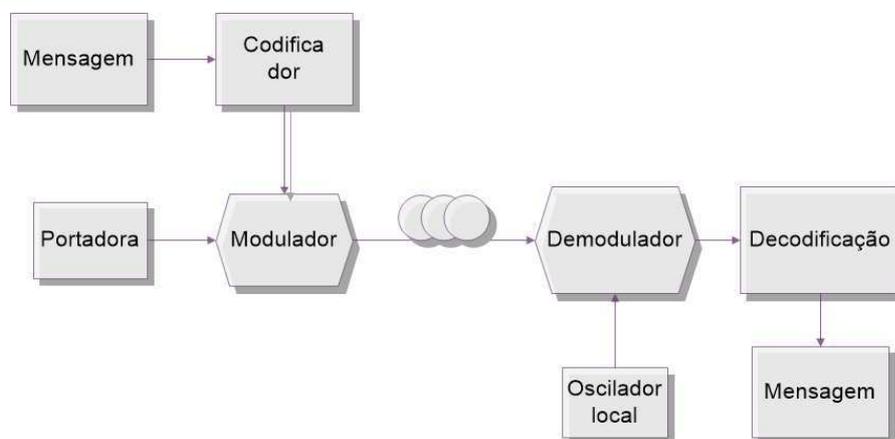


Figura 3.1: Sistema de comunicações com detecção coerente

3.1 Transmissores Ópticos

Transmissores ópticos possuem como principal função a de converter o sinal elétrico em sinal óptico e lança-lo através da fibra. Embora sua arquitetura possa variar a depender da configuração (serial ou paralelo) e do formato de modulação escolhido, assim como elencado por Seimetz (2009), em geral esta estrutura é constituída de moduladores, multiplexadores, codificadores, moduladores e fonte, sendo esta seu principal componente. Baseando-se no princípio de absorção de luz por materiais semicondutores, as fontes ópticas mais comuns utilizadas no enlace

são LEDs (*Light Emitting Diodes*) e os LASERS (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). A principal diferença entre estes é o princípio de operação, pois enquanto o LED trabalha sob o princípio de emissão espontânea e emitem luz de forma divergente, nos Lasers o uso de emissão estimulada permite controle da direção e fase da emissão.

3.1.1 Laser

Em condições normais, materiais semicondutores tendem a absorver energia luminosa. Esse fenômeno provoca o deslocamento de elétrons entre as bandas de valência e condução, de modo que quando um elétron ganha energia suficiente, ele salta para uma camada superior. No caso contrário, quando o elétron retorna a um nível de energia inferior, esse salto provoca a liberação de energia luminosa o que caracteriza a emissão espontânea. Para provocar emissão estimulada, incide-se sobre a camada de condução um fóton de energia que estimula o decaimento de elétrons para a banda de valência e provoca a emissão de fótons em mesma direção e fase do incidente.

Em termos estruturais, basicamente, lasers semicondutores são constituídos de duas junções levemente dopadas com excesso ou ausência de elétrons. Um problema com esse tipo de junção, denominada homogênea (devido ao uso do mesmo tipo de material nas duas junções), é que a recombinação elétron-lacuna ocorre em uma região relativamente ampla. Assim, o uso de uma camada intermediária (dopada ou não) permite o confinamento de portadores em ambos os lados da junção e conseqüentemente otimiza a obtenção do estado de inversão de população, caracterizada pela maior concentração de portadores na banda de condução ($N_2 > N_1$). Neste cenário, a taxa de emissão estimulada supera a de emissão espontânea ($R_{stim} > R_{abs}$), requisito fundamental para a operação do laser. Este tipo de estrutura é denominada heterojunção e sua aplicação permite não apenas a concentração de portadores como também o controle dos modos ópticos a partir da largura da camada intermediária (AGRAWAL, 2002). Em se tratando desses dispositivos, as principais características a serem avaliadas são:

- **Ganho:** obtido na região ativa quando o dispositivo alcança a condição de inversão de população. Para um sinal propagando-se nessa região, o ganho óptico é caracterizado por $\exp(gz)$, no qual g é o coeficiente de ganho. Seu valor de pico é função da densidade da portadora injetada (N), tal como pode ser observado na equação 3.1. Nesta, N_T é o valor de densidade da portadora que ao ser excedido provoca inversão de população e σ_g é o ganho diferencial.

$$g_p(N) = \sigma_g * (N - N_T) \quad (3.1)$$

- **Eficiência quântica interna:** definida como a relação entre a taxa de combinação radiativa (recombinação que produz luz) e a recombinação total que inclui uma parcela não radioativa.

$$\eta_{int} = \frac{R_{rr}}{R_{rr} + R_{nr}} \quad (3.2)$$

- **Corrente de gatilho:** corrente que proporciona o ganho mínimo necessário a ativação do laser (ganho que compense as perdas internas). Sua função é definida em 3.3, na qual T_0 é a temperatura característica.

$$I_{th}(T) = I_0 \exp(T/T_0) \quad (3.3)$$

- **Potência de lançamento:** potência lançada pelo laser quando submetida a corrente de gatilho. A relação desses dois parâmetros recebe o nome de responsividade ($R = P_e/I$) e sua caracterização é fortemente influenciada pela temperatura.

- **Largura de Linha:** largura espectral do laser.

Um aspecto a ser considerado na operação do componente é a presença dos modos longitudinais. Como deseja-se que o modo fundamental predomine sobre a transmissão, uma alternativa é a alteração do perfil de perdas nestes modos, de forma a suprimi-los ou diminuir sua influência no desempenho da transmissão, permitindo o trabalho em modo longitudinal fundamental (*single longitudinal mode* -SLM). Entre as configurações que permitem o alcance a esse objetivo estão:

- **Realimentação Distribuída (DFB):** utiliza uma grade com variação periódica de espessura que é convertida em variação periódica do índice de refração relativo e que provoca acoplamento de ondas propagando-se nas direções progressivas e regressivas.
- **Cavidade Acoplada:** a operação em modo fundamental é obtida acoplando a luz com uma cavidade externa e a realimentação ocorre apenas para os modos longitudinais que coincidem com o deste dispositivo. Uma consequência é que a refletividade da cavidade se torna dependente do comprimento de onda e provoca um perfil de perda oscilatório.
- **Lasers semicondutores sintonizáveis:** consiste de uma estrutura com três seções, denominadas região ativa, de controle de fase e seção de bragg (controle do modo), cada uma com uma corrente de entrada que permite ajuste das características associadas a cada região. Recomendados para aplicação em sistemas WDM devido a alta largura de ajuste da frequência de trabalho.

Nas figuras 3.2 e 3.3 pode ser observado o perfil de ganho para os lasers do tipo DFB e com cavidade acoplada.

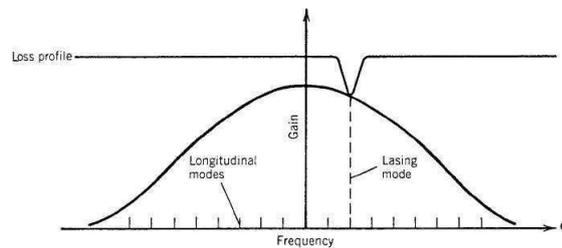


Figura 3.2: Perfil de ganho e perdas laser DFB [1]

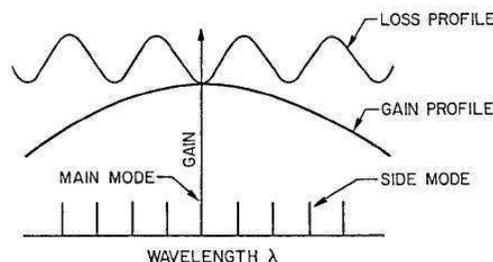


Figura 3.3: Perfil de ganho e perdas Laser com cavidade acoplada [1]

3.1.2 Moduladores

Responsáveis pelo acoplamento dos sinais, moduladores são classificados de acordo com o tipo de modulação: direta ou externa. No primeiro caso, a corrente no transmissor é posta acima ou

abaixo do valor de disparo e com isso identifica-se o bit. Para a modulação externa, mais comum, sinais ópticos e elétricos são combinados em um dispositivo interferômetro cuja quantidade de potência acoplada entre entrada e saída depende das dimensões do intervalo em destaque na figura 3.4. A diferença de caminho é dada por ΔV . Usualmente, são constituídos de material Lítio-Cobalto e utilizam o efeito eletro-óptico, no qual uma tensão aplicada produz uma mudança no índice de refração do material. Entre os mais comuns na literatura estão: modulador de fase, Mach-Zehnder e o Modulador IQ, sendo este último capaz de modulação em fase e quadratura. Ambos estão evidenciados nas figuras 3.5 e 3.6. Já suas relações de tensão entrada/saída são apresentadas nas equações 3.4, 3.6 e 3.7, respectivamente.

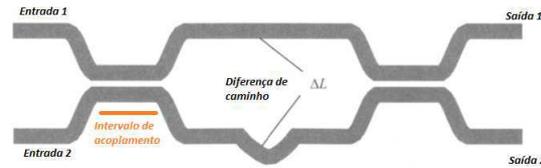


Figura 3.4: Interferômetro [14]

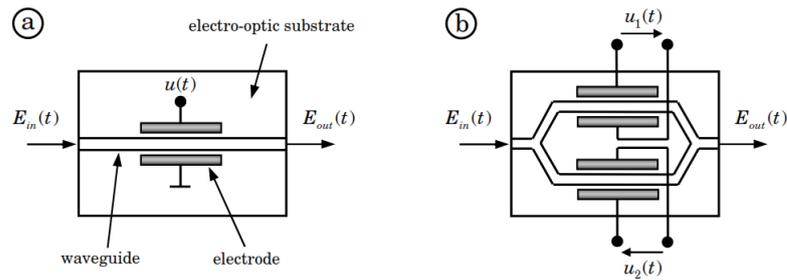


Figura 3.5: (a) Modulador de fase (PM) (b) Modulador de Mach-Zehnder (MZM) [19]

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \exp j\phi_{PM}(t) \quad (3.4)$$

$$\phi_{PM}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{eff}(t) l_{el} \quad (3.5)$$

$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = \frac{1}{2} (\exp j\phi_1(t) + \exp j\phi_2(t)) \quad (3.6)$$

$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\phi_I(t)}{2}\right) + j\frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\phi_Q(t)}{2}\right) \quad (3.7)$$

3.1.3 Formatos de Modulação

O formato de modulação corresponde a técnica de combinação do sinal modulante e a portadora, de modo a viabilizar a transmissão. Dependendo do parâmetro modificado na alocação da mensagem, o formato pode ser classificado em modulação de fase, amplitude, frequência ou uma combinação destes. Existe uma variedade de formatos, e cada um implica em considerações de custo, banda e taxas de transmissão. Neste trabalho, o foco será sobre o formato QPSK e 16 QAM.

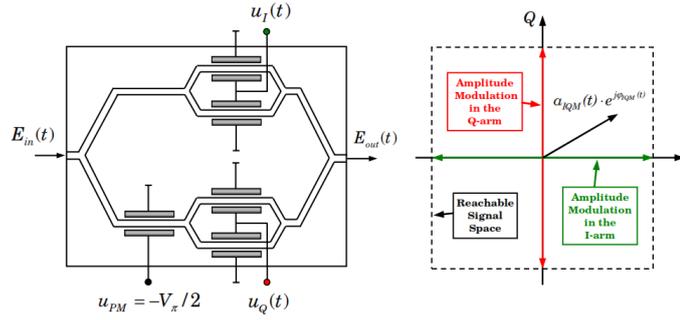


Figura 3.6: Modulador óptico IQ [19]

A modulação por deslocamento de fase (QPSK-*Quadrature Phase-Shift Keying*), conforme o nome indica, utiliza a variação de fase para representar os símbolos transmitidos (equação 3.8). Em comparação ao BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*), QPSK utiliza a mesma banda passante porém com o dobro da taxa de transmissão. Além disso, a técnica utiliza um envelope constante, o que significa que os símbolos possuem a mesma distância em relação a origem. Devido a expansão da soma interna da função cosseno, estes podem ser representados em um sistema de dois eixos ortogonais (funções 3.10 e 3.10).

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_c t + (2i - 1)\pi/4) \quad (3.8)$$

$$\phi_1 = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad (3.9)$$

$$\phi_1 = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \sin(2\pi f_c t) \quad (3.10)$$

No caso do QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), temos dois sinais modulados em duas portadoras ortogonais e transmitidos pelo mesmo canal (equação 3.11). Devido a ortogonalidade, as mensagens não interferem entre si e podem ser recuperadas no receptor sem perda de conteúdo. A técnica permite modulação de alta ordem com maior quantidade de símbolos, sendo o número de bits por símbolo (M) representado por \sqrt{M} . Por exemplo, para o 16 QAM, são transmitidos quatro bits por símbolo, valor superior ao QPSK (2 bits/símbolo).

$$s_k(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} a_k \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E}{T}} a_k \sin(2\pi f_c t) \quad (3.11)$$

3.2 Fibra Óptica

O cabo de fibra óptica é uma tecnologia que permite transporte de sinais de luz e age como um guia de ondas para sinais de alta velocidade. Sua estrutura é composta por três níveis, sendo eles o núcleo, a envoltória e a casca. Seu princípio de propagação, tendo vista uma análise geométrica, baseia-se na lei de Snell (equação 3.12), na qual um raio de luz ao incidir sobre uma superfície sofre reflexão e refração. Se o ângulo de incidência for superior a um ângulo crítico, o raio fica inteiramente confinado no interior do núcleo. Teoricamente, para que ocorra confinamento interno total, o índice de refração do núcleo deve ser superior ao da envoltória, porém as fibras podem ser projetadas com perfis de índices de refração núcleo-envoltória em degrau ou gradual. Este último permite um combate mais eficiente a dispersão multicaminho que ocorre quando os raios chegam ao receptor com diferentes velocidades.

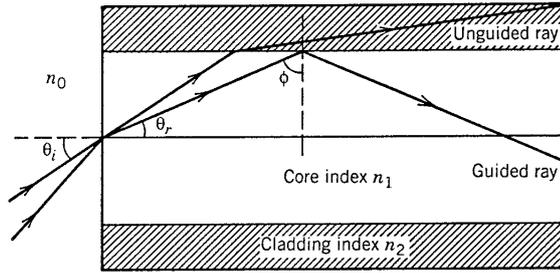


Figura 3.7: Estrutura da fibra óptica [1]

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r \quad (3.12)$$

Na abordagem ondulatória, a transmissão baseia-se no conceito de modo, uma solução específica da equação de onda 3.13, que satisfaz determinadas condições de fronteira e cuja distribuição espacial não se altera com a propagação. $A(z, t)$ é definida como a amplitude do pulso, e β_1 , β_2 e β_3 representam as dispersões de modo, cromática e de alta ordem.

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} = 0 \quad (3.13)$$

O meio fibra óptica não é um canal perfeito e sua utilização deve considerar três aspectos críticos, sendo eles perdas, dispersão e não linearidades. Entre os principais efeitos dispersivos destacam-se:

1. **Dispersão Cromática:** (i) atraso diferencial que várias componentes espectrais do pulso ou do sinal propagante (ii) dependência do índice de refração em relação a frequência.
2. **Modos de polarização:** as duas componentes de polarização se dispersam ao longo da fibra devido a diferentes velocidades de grupo.
3. **Modal:** interferência entre modos, para o caso de propagação multimodo.
4. **Alta ordem:** dispersão diferencial que ocorre para modulação de alta ordem ou para altas taxas.

No caso de perdas, considera-se:

1. **Atenuação:** a fibra apresenta uma perda de potência inerente a própria estrutura. Esse valor gira em torno de 0,2 dB/km, sendo um limitante para transmissões em longas distâncias.
2. **Absorção material:** pode ocorrer devido a natureza do material (intrínseca) ou devido a impurezas (extrínseca). Dependendo da frequência, esse fator passa a ser crítico, algo evidenciado pelo perfil de perdas apresentado na figura 3.8. Observa-se que para o comprimento de onda de $1,4 \mu m$, verifica-se um considerável valor de perdas de potência, devido principalmente à alta concentração de oxidrilas (OH) neste região que absorvem parte da energia do sinal. Nesta frequência, uma opção é o uso de fibras secas.

Levando em consideração essa característica do meio, alguns tipos de fibras são fabricadas, a partir da variação das áreas do núcleo e do índice relativo, com a função de minimizar os efeitos dispersivos nas proximidades de determinados pontos do espectro com baixa atenuação. Esse é o caso, por exemplo, da fibra com deslocador de dispersão (DSF), projetada com dispersão mínima na região de $1,55 \mu m$.

3. **Imperfeições na estrutura:** falhas, ranhuras ou a presença de sujeira entre conexões provocam perdas de potência, pois comprometem o acoplamento dos sinais ao longo da transmissão.
4. **Espalhamento de Rayleigh:** variações no índice de refração ou flutuações de densidades do material;

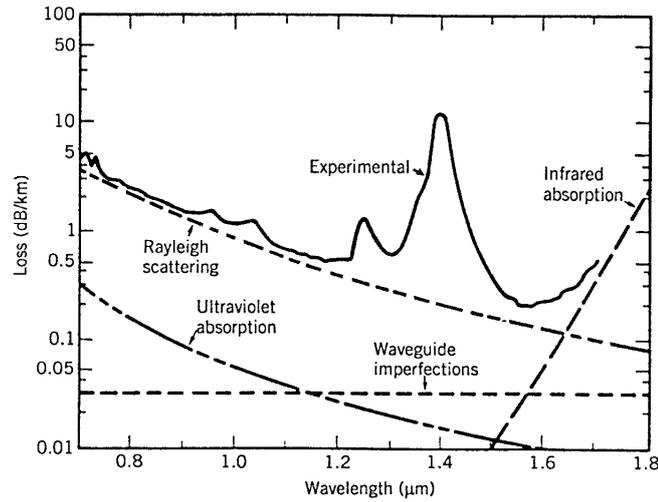


Figura 3.8: Perfil de perdas na fibra óptica [1]

Efeitos ópticos não lineares

Não linearidades ocorrem principalmente devido a presença de campos eletromagnéticos intensos ou características do material. Nestas circunstâncias, o índice de refração da sílica é caracterizado pela soma de duas parcelas, incluindo um fator não linear e a influência da potência do sinal P e a área efetiva do núcleo tal como definido na equação 3.14.

$$\eta'_j = \eta_j + \eta_2 = \eta_j + \eta_2(P/A_{eff}) \quad (3.14)$$

A presença da não linearidade η_2 faz com que a constante de propagação da onda (β) seja influenciada pelo valor de P . Isto gera uma variação de fase auto induzida (SPM -*Self-Phase Modulation*), conforme reforçado pela análise das equações 3.15 e 3.17, na qual L_{eff} é definido como o comprimento efetivo de interação da fibra. A variação de fase não linear provoca espalhamento e alteração do formato do pulso, repercutindo sobre o aumento de banda do sinal e redução de eficiência espectral.

$$\beta' = \beta + \gamma P \quad (3.15)$$

$$\gamma = 2\pi\eta_2/(A_{eff}\lambda) \quad (3.16)$$

$$\phi_{NL} = \gamma P_{in} L_{eff} \quad (3.17)$$

Para o caso de sistemas multicanais, o deslocamento de frequência não depende exclusivamente da potência do canal individual, sofrendo impacto das potências dos demais canais na fibra. Esse fenômeno é definido como modulação de fase cruzada (XPM-*Cross Phase Modulation*). Na equação 3.18, observa-se que a potência nos canais vizinhos influencia com o dobro de

potência no cálculo da variação de fase. Entretanto, para canais largamente espaçados, como os pulsos viajam com velocidades diferentes em cada canal, o efeito do XPM pode ser considerado desprezível.

$$\phi_j = \gamma L_{eff} \left(P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right) \quad (3.18)$$

Ainda considerando sistemas multicanais, tem-se a mistura de quatro ondas (FWM-*Four Wave Mixing*) que ocorre quando três sinais ópticos com frequências w_1 , w_2 e w_3 , copropagados dentro da fibra simultaneamente, produzem uma quarta onda cuja frequência é dada pela combinação aritmética das suas geradoras. Esse efeito é consequência da susceptibilidade elétrica não linear de terceira ordem χ^3 do material e tem como principal consequência a contribuição com efeitos de modulação cruzada. Sua representação pode ser observada na figura 3.9.

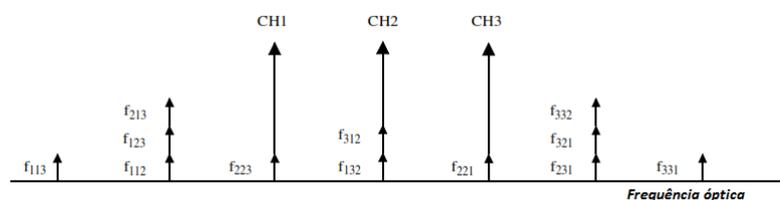


Figura 3.9: Mistura de quatro ondas [9]

Outro efeito não linear é o espalhamento de Raman. Este ocorre devido a perda de energia dos fótons da onda, sendo esta absorvida pelas moléculas de sílica que ficam em estado vibracional. Entretanto, esse aspecto é aproveitado na fabricação de amplificadores, conforme será explicado na próxima seção.

3.3 Amplificadores Ópticos

Amplificadores ópticos são dispositivos de ganho, utilizados para prover aos sinais a potência necessária para que estes alcancem pontos significativos do enlace e consigam ser detectados na recepção. Diferentemente dos repetidores utilizados até o início dos anos 90, estes dispositivos não demandam conversão óptico-eletró-óptico, são insensíveis ao formato de modulação e taxa, além de possuírem grande largura de banda de ganho, o que permite sua utilização em sistemas WDM. Entre os mais comuns estão os amplificadores a fibra dopada de érbio (EDFA) e os amplificadores Raman.

Basicamente, a estrutura do EDFA é organizada conforme a figura 3.10. Na entrada da fibra dopada, uma fonte de bombeio em frequência inferior a do sinal induz os íons de érbio a saltarem para uma banda de energia superior levando a condição de inversão de população, e na presença do sinal a ser amplificado, esses átomos ionizados são estimulados a cederem sua energia à este. A presença do isolador se faz necessária para evitar reflexões internas no dispositivo. A utilização do EDFA apresenta várias vantagens como a não introdução de interferência intercanal, independência a polarização e a disponibilidade de fontes de bombeio compactas e de alta potência (RAMASWAMI, 2009) o que repercuti diretamente sobre seu preço em comparação aos amplificadores de Raman. Porém, o EDFA possui um perfil de ganho disforme como observado na figura 3.11, que para o caso de sistemas WDM contribui para a desigualização dos canais recebidos.



Figura 3.10: Amplificador dopado a íons de erbó (EDFA)

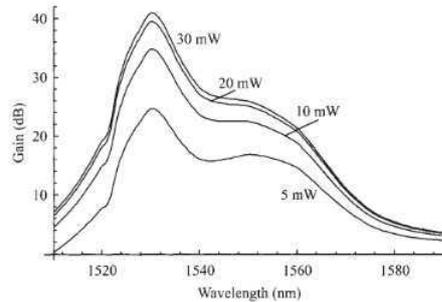


Figura 3.11: Perfil de ganho do amplificador EDFA para uma fibra de 15km e laser de bombeio com $\lambda = 980nm$ [14]

O princípio de operação do amplificador de Raman utiliza o efeito não linear de mesmo nome, no qual os elétrons da camada de condução cedem parte da sua energia na criação de fótons com baixas frequências, enquanto a outra parcela é absorvida pela fibra, deixando suas moléculas em estado vibracional. No caso do dispositivo, a fonte de bombeio provoca o deslocamento desses elétrons e, na presença do sinal, estes se comportam similarmente aos íons de érbio do EDFA. Seu grande diferencial está na sua capacidade de prover ganho em praticamente qualquer comprimento de onda além de permitir a composição, a partir da combinação de diversas fontes de bombeio, de um perfil de ganho uniforme. Porém, isto requer fontes de alta potência, o que o torna seu custo mais elevado em relação ao EDFA.

Embora proporcione o aumento da amplitude do sinal, o amplificador também insere ruído aditivo, principalmente devido a Emissão Espontânea Amplificada (*ASE- Amplified Spontaneous Emission*), pois como sua condição de operação depende da inversão de população, alguns fótons acabam liberados espontaneamente em direções, fases e polarizações aleatórias, e são tratados pelo dispositivo como um campo elétrico adicionado ao sinal. A figura de mérito para avaliação da eficiência do dispositivo é a figura de ruído, definida pela relação da SNR na entrada e saída do dispositivo, conforme exposto na equação 3.19.

$$F = \frac{SNR_{entrada}}{SNR_{saida}} \quad (3.19)$$

3.4 Receptores

No outro extremo do sistema de transmissão estão os receptores, dispositivos responsáveis por converter o sinal óptico em elétrico e extrair a informação transmitida. Estes podem ser de dois tipos: detecção direta ou recepção coerente.

3.4.1 Detecção Direta

Os receptores com detecção direta utilizam geralmente dispositivos semicondutores que possuem a propriedade de converter intensidade luminosa em corrente (fotodetectores). Em termos estruturais são constituídos de junções p-n ou p-i-n tal como nos lasers semicondutores, podendo ter sua eficiência melhorada pela utilização de cavidades refletoras (*Fabry-Perot*) ou um guia de onda. Entre os principais critérios a serem analisados neste tipo de dispositivo estão:

1. **Responsividade:** relação entre a potência de entrada e a corrente gerada;
2. **Sensibilidade:** potência mínima para manter determinado valor de BER (*Bit Error Rate*);
3. **Tempo de subida:** tempo necessário para a corrente passar de 10 % a 90 % do seu valor final quando a potência de entrada muda abruptamente. Pode ser definida pela equação 3.20, na qual τ_{tr} é o tempo de trânsito ou demora para que as portadoras sejam coletadas e τ_{RC} é a constante de tempo;

$$T_r = \ln 9(\tau_{tr} + \tau_{RC}) \quad (3.20)$$

4. **Eficiência Quântica:** Taxa de geração de elétrons pela taxa de fótons incidentes;

Além disso, leva-se em conta as características do material que comprometem o desempenho da recepção. Os principais a serem considerados são:

- **Corrente de escuro:** corrente gerada na ausência de sinal óptico e que pode ser originada pela combinação elétron-lacuna devido a efeito térmico;
- **Ruído de disparo:** aleatoriedade do movimento dos elétrons;
- **Ruído térmico:** influência da temperatura sobre o movimento dos elétrons no material;
- **Ruído aditivo:** geralmente, proveniente dos estágios de amplificação no dispositivo de recepção;
- **Taxa de extinção:** potência emitida mesmo no estado de espera (*off*) ;
- **Flutuações de corrente:** devido ao fato de que a corrente gerada tende a oscilar dentro de uma faixa de operação;

3.4.2 Fundamentos de Detecção Coerente

A segunda alternativa em termos de recepção é o uso de detecção coerente, caracterizada pela presença de um oscilador local nesta etapa do sistema. Diferentemente dos modelos com detecção direta, essa possibilidade permite modulação não apenas em amplitude, mas também em fase e frequência, e com isso obtém-se um aumento da sensibilidade do dispositivo, além de um uso mais eficiente da largura de banda da fibra. Dependendo da configuração, sistemas coerentes podem ser classificados da seguinte maneira:

- **Detecção homódina:** utiliza frequências idênticas na portadora e no oscilador local, porém apresentam como desafio principal sua sincronização, pois requer um controle rigoroso de fases. Várias técnicas são propostas para lidar com o este problema, entre as principais encontradas na literatura estão: dado auxiliado (envio de uma sequência de dados preâmbulo com informações de sincronização), decisão direta, sem dado auxiliado e sistema corretivo em malha fechada.

- **Detecção heteródina:** a informação do sinal óptico é transferido para uma portadora elétrica com frequência intermediária, dada pela diferença entre as frequência do laser e do oscilador local. Em comparação com a detecção homódina, este caso apresenta SNR inferior e maior banda passante, porém traz como vantagem a simplicidade de implementação.

O esquema básico de detecção coerente está representado na figura 3.12. O sinal recebido é acoplado ao gerado pelo oscilador local e depois recombinados para produzir a fotocorrente que será utilizada na identificação do sinal. Ao empregar esse princípio, todas as informações de fase, amplitude e frequência são transferidas do domínio óptico para o elétrico (SEIMETZ, 2009). Matematicamente, os campos na entrada do acoplador são definidos pelas equações 3.21 e 3.22, nas quais P_s e P_{lo} são as potências da portadora e do oscilador local, w_s e w_{lo} são as frequências angulares, ϕ_s e ϕ_{lo} são as fases iniciais, $\phi_{\eta s}(t)$ e $\phi_{\eta lo}(t)$ são os ruídos de fase dos lasers, e \mathbf{e}_s e \mathbf{e}_{lo} são os vetores de polarização do sinal recebido e do gerado no oscilador local.

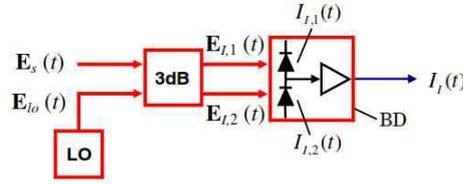


Figura 3.12: Princípio de detecção coerente [19]

$$E_s(t) = \sqrt{P_s} e^{j(w_s t + \phi_s)} a(t) e^{j\phi(t)} e^{j\phi_{\eta s}(t)} \mathbf{e}_s \quad (3.21)$$

$$E_{lo}(t) = \sqrt{P_{lo}} e^{j(w_{lo} t + \phi_{lo})} a(t) e^{j\phi_{\eta lo}(t)} \mathbf{e}_{lo} \quad (3.22)$$

Já a corrente resultante da combinação das fotocorrentes geradas é definida na equação 3.23, na qual i_{sh} é a corrente de ruído balístico após a detecção, $\Delta w = w_s - w_{lo}$ é o deslocamento de frequência, $\phi_{\eta}(t) = \phi_{\eta s}(t) - \phi_{\eta lo}(t)$, $\phi_0(t) = \phi_s(t) - \phi_{lo}(t)$ e R é a responsividade dos fotodetectores. Não é o objetivo neste texto o detalhamento das equações apresentadas. Mais informações sobre o equacionamento de detecção coerente pode ser encontrado em (SEIMETZ, 2009).

$$I_I(t) = 2R\sqrt{P_s P_{lo}} a(t) \mathbf{e}_s \mathbf{e}_{lo} \sin[\Delta w t + \phi_{\eta}(t) + \phi_0 + \phi(t)] + i_{sh} \quad (3.23)$$

No caso da detecção de componentes em fase e quadratura, a organização da figura 3.12 pode ser reajustada conforme apresentado na figura 3.13. Os sinais recebido e do oscilador local são superpostos utilizando um dispositivo denominado híbrida. Este é responsável pela separação das componentes, estando em sequência com fotodiodos, filtros, conversores AD e a etapa de DSP. Neste caso, as duas correntes geradas são definidas como funções ortogonais (equações 3.24 e 3.25), nas quais i_{shI} e i_{shQ} são as correntes de ruído balístico de cada componente.

$$I_I(t) = R\sqrt{P_s P_{lo}} a(t) \mathbf{e}_s \mathbf{e}_{lo} \cos[\Delta w t + \phi_{\eta}(t) + \phi_0 + \phi(t)] + i_{shI} \quad (3.24)$$

$$I_I(t) = R\sqrt{P_s P_{lo}} a(t) \mathbf{e}_s \mathbf{e}_{lo} \sin[\Delta w t + \phi_{\eta}(t) + \phi_0 + \phi(t)] + i_{shQ} \quad (3.25)$$

Devido a presença do oscilador no estágio de recepção, alguns aspectos devem ser considerados em relação a degradação da sensibilidade do sinal:

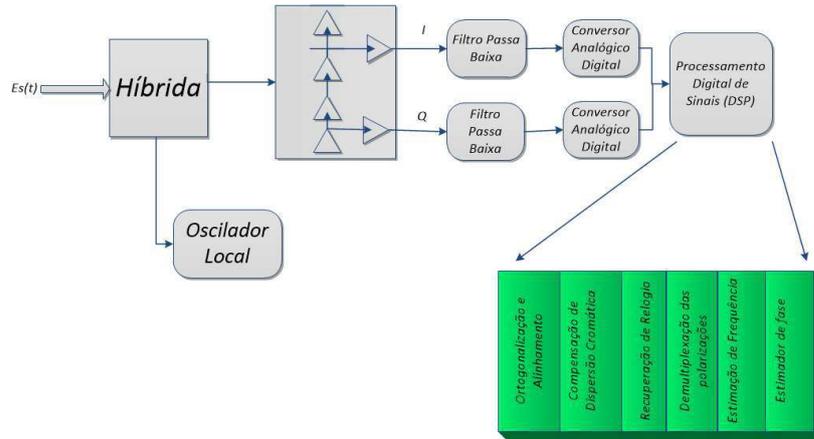


Figura 3.13: Configuração do Receptor Coerente (RXn)

1. **Ruído de fase:** sincronizar a portadora e o oscilador local se torna um desafio devido a presença do ruído de fase neste. Como a corrente no receptor está definida pelas equações 3.24 e 3.25, variações de fase implicam em variações de corrente e consequente degradação da SNR. Uma alternativa é trabalhar com *Phase-Diversity Receivers* que utilizam um ou mais fotodetectores para produzir um sinal que é independente da variação de fase intermediária.
2. **Intensidade do ruído:** considerada desprezível para determinadas configurações, no caso da recepção coerente, o oscilador local passa a contribuir com intensidade de ruído. Como pode ser observado no cálculo da SNR na equação 3.26, o aumento do valor de P_{LO} aumenta essa contribuição com o quadrado do valor.

$$SNR = \frac{2R^2\overline{P_s}P_{LO}}{2q(RP_{LO} + I_d)\Delta f + \sigma_T^2 + 2R^2P_{LO}^2(RIN)\Delta f} \quad (3.26)$$

3. **Incompatibilidade de polarizações:** ocorre quando a polarização do sinal recebido difere do sinal transmitido, resultado do fenômeno de birrifringência devido a mudanças no ambiente como variações de temperatura. Este efeito influi nos valores de BER e consequentemente no desempenho do sistema. Uma alternativa é o uso de controladores de polarização ao longo da transmissão.
4. **Outros efeitos:** podem ser considerados dispersão, reflexões múltiplas e não linearidades.

3.5 Processamento Digital de Sinais (DSP)

Conforme ressaltado na seção 3.2, a transmissão na fibra óptica sofre degradação devido as características intrínsecas do canal e configurações do enlace. Dessa forma, a etapa de processamento digital do sinal (PDS) assume o papel de minimizar efeitos da camada física, corrigindo erros de sincronismo e compensando distorções. As principais funções desta fase estão representadas na figura 3.13 e podem ser destacadas da seguinte forma:

1. **Ortogonalização e alinhamento:** possui a função de compensar distorções na híbrida (dispositivo responsável pela separação das polarizações e suas componentes) e diferenças de potência entre as componentes de fase e quadratura. Pode utilizar o algoritmo de Gram Schmidt.

2. **Compensação de Distorção:** utiliza um filtro equalizador com coeficientes calculados que correspondem a função de transferência inversa da dispersão cromática.
3. **Recuperação de relógio:** sincroniza o tempo de símbolo com o de amostragem. Utiliza algoritmos de Gardner, por exemplo.
4. **Demultiplexação de polarização:** responsável pela separação das duas polarizações transmitidas. Pode utilizar um algoritmo de módulo constante (CMA) com quatro filtros de resposta ao impulso finita (FIR).
5. **Equalizador:** utiliza um filtro com coeficientes calculados utilizando Algoritmo Mínimos Quadráticos (LMS) ou CMA, por exemplo.
6. **Estimação de fase e frequência:** corresponde a uma etapa de sincronização. Entre as técnicas disponíveis com este objetivo estão o envio de um preâmbulo com informações de tempos da portadora e do símbolo com padrão conhecido (dado auxiliado) ou a utilização das características do sinal recebido na determinação de erro de fase (decisão direta), de forma que o receptor possui a tarefa de extrair informações do sinal modulado e estabelecer o sincronismo a partir de estimadores em malha aberta ou fechada, *Feed- Forward Phase Estimation*, por exemplo.

Capítulo 4

Análise de Desempenho de Redes

Para avaliação de sistemas de comunicações, algumas figuras de mérito são definidas com o objetivo de verificar o desempenho da transmissão. Matematicamente, um aspecto crítico a ser avaliado é a probabilidade de erro P_e , dada pela probabilidade condicionada da mensagem transmitida não ter sido recebida (equação 4.1). Porém, computacionalmente esse cálculo se torna impraticável, pois as funções que envolvem esse resultado geralmente se apresentam bastante complexas, além de variar a depender do canal ou formato de modulação. Dessa forma, uma figura de mérito que se torna mais alcançável e largamente utilizada é a Taxa de Erro de Bits (BER- *Bit Error Rate*), que conforme o nome indica representa uma mensuração da quantidade de bits erroneamente recebidos. Tecnicamente, objetiva-se que a BER seja a menor possível, porém com a introdução recente de correção progressiva de erros (FEC) nos sistemas de transmissão óptica, este parâmetro pode chegar a uma máximo na ordem de 10^{-3} , de modo que a recuperação do sinal ainda seja possível. Em sistemas de modulação de alta ordem como 16 QAM, este limite é estabelecido. Em relação direta com a BER, também pode ser utilizada a Taxa de Erro de Símbolo (SER- *Symbol Error Rate*) que permite avaliação da quantidade de símbolos erroneamente recebidos. Outra alternativa de avaliação é o uso do limitante da união, uma função que depende do formato de modulação empregado, mas que proporciona uma estimativa sobre o valor máximo da probabilidade de erro.

$$P_e = \sum_{i=1}^M p_i p(m_j \text{ recebido} / m_i \text{ transmitido}) \quad (4.1)$$

Outro parâmetro quantitativo é a Relação sinal Ruído (SNR - *Signal Noise Rate*) e que estabelece um quociente direto entre a potência do sinal e a do ruído presente na transmissão. Esse parâmetro serve como base para avaliação comercial do sistema, uma vez que a potência necessária está diretamente relacionada com o custo, e considerando o ruído como um parâmetro universal, o objetivo é minimizar a demanda de potência do sinal dentro de limites que não comprometam a recuperação da mensagem. No caso de recepção coerente, a SNR se relaciona inversamente, conforme equação 4.3, ao valor do Vetor de Magnitude de erro (EVM- *Error Vector Magnitude*), definido na equação 4.4. O EVM também é uma figura de mérito que proporciona informação sobre a distância entre os símbolos complexos transmitidos e o recebidos, podendo ser interpretado em termos de porcentagem (REIS, 2012).

$$SNR = 20 \log(P_{sig} / P_{ruído}) \quad (4.2)$$

$$EVM_{rms} = \sqrt{\frac{1}{SNR}} \quad (4.3)$$

$$EVM_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |s_i - s_i'|^2}{\sum_{i=1}^N |s_i|^2}} \quad (4.4)$$

Tanto a BER quanto a SNR proporcionam uma análise quantitativa do desempenho, porém esta pode ser feita indiretamente mediante a observação da constelação recebida ou o diagrama de olho. A constelação é a representação de M sinais em um conjunto de N bases ortogonais. Por exemplo, na figura 4.1 pode ser observado o conjunto de 4 símbolos QPSK representados em eixos definidos por duas funções bases ortogonais cosenoidais. Já o digrama de olho (figura 4.2) é superposição de uma sequência elétrica de bits e permite a análise de efeitos distorcivos sobre a amplitude e fase, pois quanto mais influentes esses forem, o diagrama tende a apresentar um formato mais fechado. Desse modo, sua largura proporciona um intervalo em que o sinal pode ser amostrado com o mínimo de interferência intersimbólica, estando o melhor momento de amostragem localizado no instante de máxima abertura do olho.

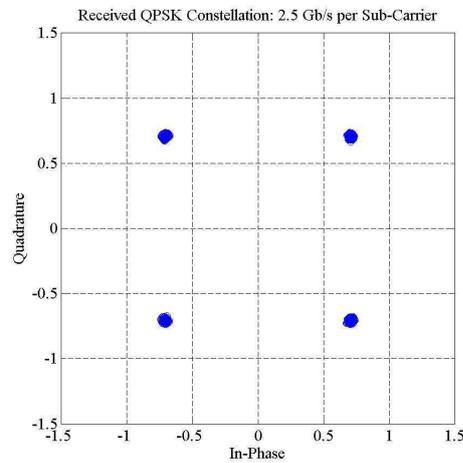


Figura 4.1: Constelação QPSK

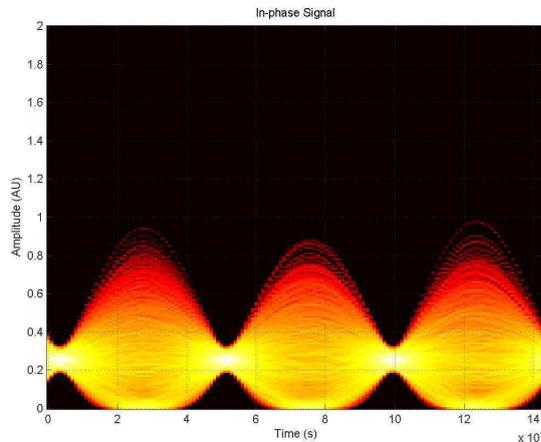


Figura 4.2: Diagrama de olho

Capítulo 5

Resultados Simulados

5.1 Parâmetros do simulador e metodologia

Nas simulações apresentadas neste trabalho, utilizou-se o *software Optical Simulator*, desenvolvido no CPqD para verificação e análise de desempenho relacionados a sistemas de transmissão óptica. Estruturado conforme observado na figura 5.1, o programa consiste em um conjunto de funções escritas em linguagem Matlab e que representam cada trecho do enlace.

No transmissor, cada canal é representado por um laser em frequência específica seguido de um modulador alimentado por sinais aleatórios gerados pelo DAC (*Digital Analog Converter*). O laser possui fase zero e ruído de intensidade. O modulador IQ recebe sinais em fase e quadratura com formato de pulso definido (NRZ, Nyquist, NZ), sendo seguido de um filtro gaussiano de alta ordem.

Após a multiplexação, o sinal é transmitido pela fibra SSMF com atenuação de $\alpha = 0,20$ dB/km, dispersão cromática $D = 16,5$ ps/(nm.km) e parâmetro não linear de $\gamma = 1,35(W.km)^{-1}$. A propagação é simulada pelo método *Split-Step Fourier* (método de Fourier com degrau repartido), implementado utilizando a equação de onda da transmissão. São consideradas dispersão cromática, auto-modulação de fase e mistura de quatro ondas. O sinal é recebido em um atenuador e repassado pela híbrida, após rebatido com o oscilador local. Os sinais em fase e quadratura são convertidos por meio de detectores balanceados. Corrente térmica e de ruído balístico são consideradas neste estágio. O sinal é convertido de analógico para digital, sendo processado pelo DSP para compensar efeitos da camada física. O resultado é visualizado em termos do espectro recebido e constelação, ou analisado quantitativamente em termos de BER, EVM ou fator Q.

5.2 WDM PON 16 canais QPSK

Após o estudo e familiarização com o simulador *Optical Simulator* (CPqD), realizou-se a simulação da transmissão WDM no sentido rede-usuários com as seguintes características:

- Modulação QPSK em uma polarização;
- 16 canais WDM;
- Espaçamento entre canais: 25 GHz;
- Alcance: 50 km;
- Atenuação na recepção: 1/16;
- Potência do laser: -6 dBm;

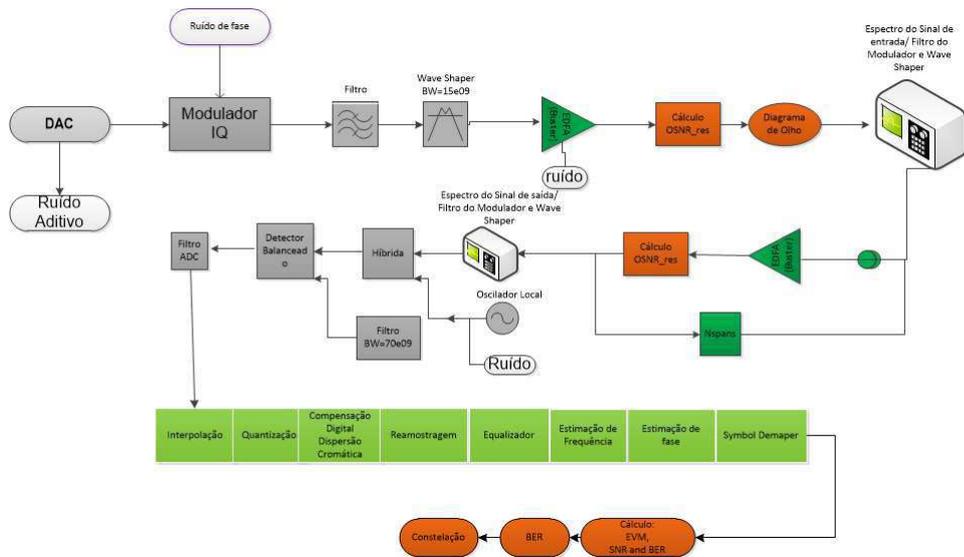


Figura 5.1: Estrutura do Simulador

- Largura de linha do laser: 100 kHz;
- Taxa de símbolo: 10 Gbaud \Rightarrow 20 Gbit/s;
- Filtro modulador com largura de banda de 30 GHz e ordem 2;
- Wave Shapper com largura de banda de 15 GHz e ordem 8;
- Pré Amplificador com potência de lançamento de 12 dBm;

Primeiramente o sistema foi simulado em *back-to-back* (transmissor diretamente conectando ao receptor) e depois com trecho de fibra, utilizando o método *Split Step Fourier* até que fossem conseguidos valores adequados de BER e SNR. Então, realizou-se a avaliação da sensibilidade do receptor por meio de uma caracterização em termos da curva BER x SNR. Para isso, variou-se o segundo parâmetro adicionando ruído ASE ao pré-amplificador. Nas figuras 5.2 - 5.5 podem ser observados os resultados alcançados. A caracterização foi realizada para cada um dos 16 canais, porém o desempenho se mostrou bastante similar para todos estes, variando em uma faixa relativamente estreita, conforme pode ser verificado pelos valores destacados na figura 5.6.

Explorou-se a possibilidade de diminuição do espaçamento entre canais, porém mantendo as características da transmissão e ao mesmo tempo objetivando valores de BER aceitáveis. Nestas condições, o espaçamento mínimo entre canais conseguido foi de 15 GHz, para o qual podem ser observados nas figuras 5.7 - 5.9 os espectros de entrada, saída e a constelação do sinal recebido. Como esperava-se, o comportamento do sistema com essa alteração se apresentava bastante suscetível ao ruído e distorções, assim como efeitos não-lineares.

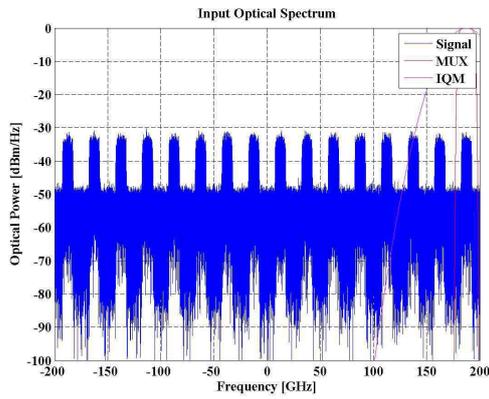


Figura 5.2: Espectro de entrada [WDM 16 canais QPSK $SNR \sim 15dB$]

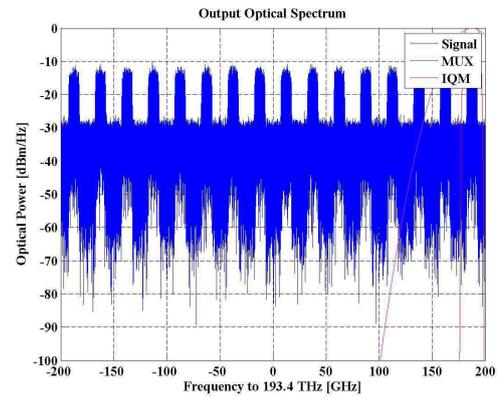


Figura 5.3: Espectro de saída [WDM 16 canais QPSK $SNR \sim 15dB$]

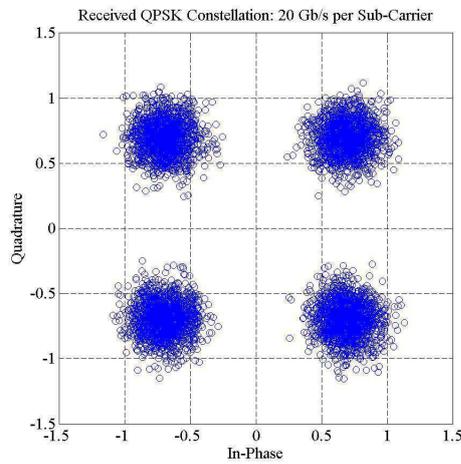


Figura 5.4: Constelação [WDM 16 canais QPSK $SNR \sim 15dB$]

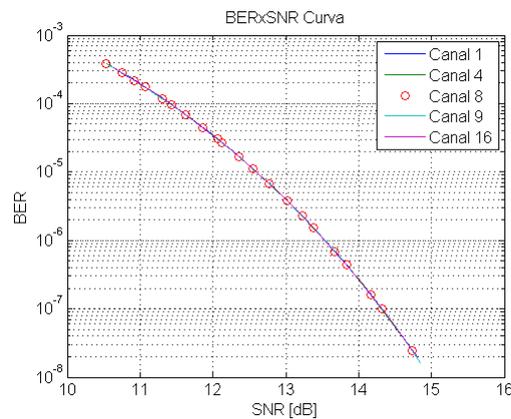


Figura 5.5: Caracterização BERx SRN

5.3 UDWDM 16 canais QPSK

O segundo esquema de teste teve como ponto de partida os resultados do artigo *Analysis of Transmission Impairments on Terabit Aggregate PONs*. Para isso considerou-se as seguintes

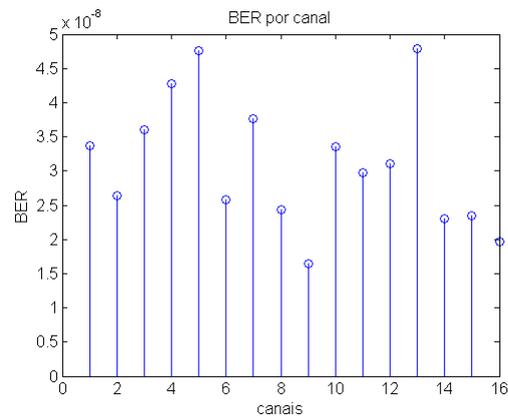


Figura 5.6: BER por canal WDM para uma SNR de 14,5dB

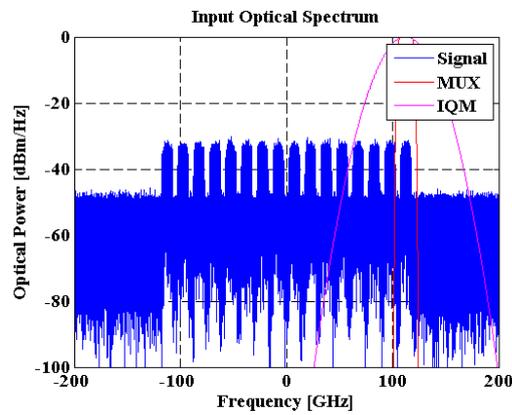


Figura 5.7: Espectro de entrada [WDM 16 canais QPSK SSF Espaçamento 15GHz $SNR = 14,5dB$]

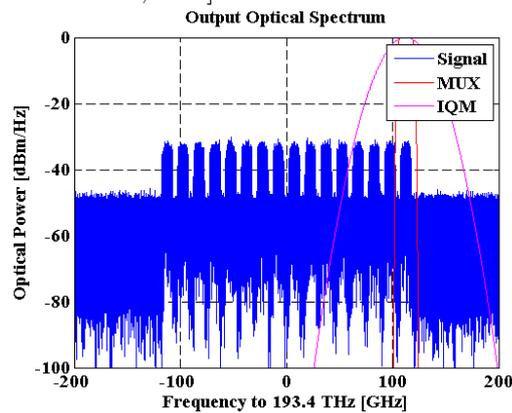


Figura 5.8: Espectro de saída[WDM 16 canais QPSK SSF Espaçamento 15GHz $SNR = 14,5dB$]

características:

- Modulação QPSK em uma polarização;
- 16 canais WDM;

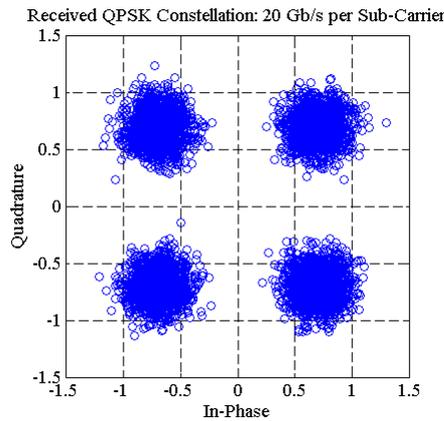


Figura 5.9: Constelação [WDM 16 canais QPSK SSF Espaçamento 15GHz e $SNR = 14,5dB$]

- Espaçamento entre canais: 3,125 GHz;
- Alcance: 25 km;
- Atenuação na recepção: 1/16;
- Potência do laser: -1 dBm;
- Largura de linha do laser: 100 kHz;
- Taxa de símbolo: 1,25 Gbaud \Rightarrow 2,5 Gbit/s;
- Filtro modulador com largura de banda de 30 GHz e ordem 2;
- Wave Shapper com largura de banda de 15 GHz e ordem 8;
- Pré Amplificador com potência de lançamento de 12 dBm;

Os símbolos na constelação recebida apresentaram uma variação de fase, algo apenas corrigido alterando a largura de linha do laser, como pode ser observado no comparativo das figuras 5.10 e 5.11. Este efeito também pode ser contornando na etapa de DSP. Já para o caso da transmissão 16 QAM (figuras 5.12-5.14), manteve-se as alterações mencionadas, porém alterou-se a potência deste dispositivo para $-5dBm$.

Como o cenário UDWDM se apresentou mais restritivo e devido as limitações práticas do sistema experimental, optou-se pela validação do primeiro caso, tendo sem vista que sua aplicação em redes de acesso se enquadra no contexto do problema em análise e da motivação desse trabalho. Os resultados validados são apresentados no capítulo seguinte.

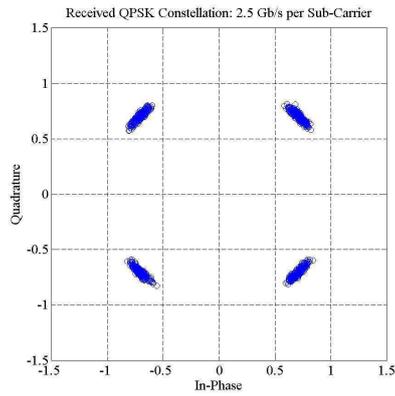


Figura 5.10: Constelação [WDM 16 canais, QPSK, SSF, Espaçamento 3,125 GHz, Largura de linha 100 kHz, potência no laser -1 dBm]

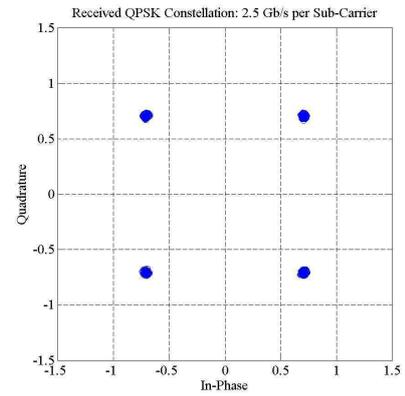


Figura 5.11: Constelação [WDM 16 canais, QPSK, SSF, Espaçamento 3,125 GHz, Largura de linha 1 kHz, potência no laser -1 dBm]

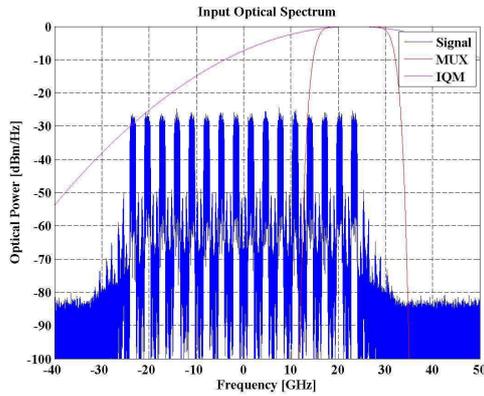


Figura 5.12: Espectro de entrada [WDM 16 canais, 16QAM, SSF, Espaçamento 3,125 GHz, Largura de linha 1 kHz, potência no laser -5 dBm]

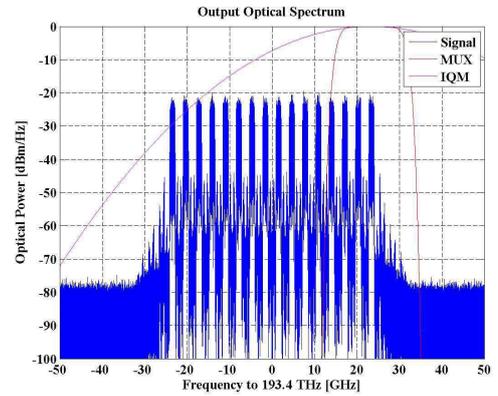


Figura 5.13: Espectro de saída [WDM 16 canais, 16QAM, SSF, Espaçamento 3,125 GHz, Largura de linha 1 kHz, potência no laser -5 dBm]

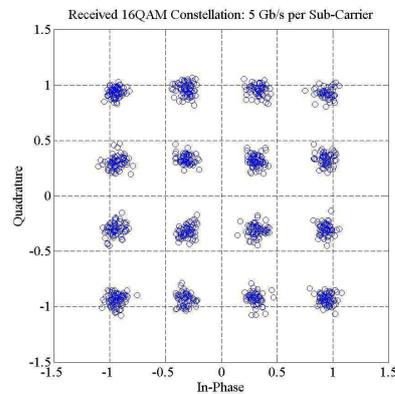


Figura 5.14: Constelação [WDM 16 canais, 16QAM, SSF, Espaçamento 3.125 GHz, Largura de linha 1kHz, potência no laser -5 dBm]

Capítulo 6

Resultados Experimentais

A implementação laboratorial do sistema WDM 16 canais QPSK foi realizado conforme o esquemático da figura 6.1. No transmissor, 16 lasers de cavidade externa (ECL), sintonizados em torno de 193,4 THz, espaçados de 25 GHz e com potência de 16 dBm, são acoplados em dois grupos de oito, que passam por um segundo acoplador e então são inseridos como portadora no modulador. Os dados são gerados utilizando sequências aleatórias codificados em símbolos complexos que passam por um filtro gaussiano de pré-ênfase cujos parâmetros ótimos (largura de banda, atenuação central e atenuação no ponto médio) são calculados utilizando um algoritmo genético. Os dados são enviados para um Conversor Analógico Digital, amplificados e então aplicados em um modulador IQ, no qual são modulados pelas portadoras geradas no transmissor WDM. Esta saída é modulada e passa por uma pré-amplificação (Buster). Ao sinal modulado é adicionado uma parcela de ruído de emissão espontânea (ASE), gerado por dois amplificadores em cascata e em sequência com um atenuador variável que permite o controle da relação sinal ruído. Devido a limitação em termos do circuito de recepção coerente, a avaliação de cada canal foi realizada individualmente, de modo que a frequência do oscilador local fosse colocada em sincronia com a de transmissão, dependendo do canal em análise.

A caracterização de seis canais foi realizada: os centrais (C8 e C9), os extremos (C1 e C16) e dois intermediários (C5 e C11). A avaliação em *back-to-back* representada pela curva de BER por SNR pode ser observada na figura 6.2. Verifica-se que o desempenho dos canais centrais demonstrou-se inferior aos dos demais, principalmente em relação aos canais extremos, pois exige uma maior SNR para o mesmo valor de BER dos demais. Este fato é reforçado pela desigualização dos canais, como pode ser visto no espectro recebido (figura 6.3), pois os canais citados chegam ao receptor com nível de potência inferior. A redução desse desnível foi realizada por meio do controlador de polarização (visto que o modulador suporta a transmissão TE e TM), porém o melhor resultado trazia uma diferença de cerca de 2 dBm entre os níveis máximos e mínimo de potência nos canais. Comparativamente ao sistema simulado, a caracterização experimental apresentou desempenho inferior, fato evidenciado na figura.

Para a validação dos resultados, alguns fatores foram levados em consideração:

- Redução do nível de potência do sinal com atenuador de 10 dB e utilização de dois amplificadores em cascata na geração da ASE, o que permitiu trabalhar com uma faixa de SNR entre 10-25 dB;
- A perda de inserção dos equipamentos utilizados, entre o intervalo de 0,1 - 1 dB.

Realizada a avaliação de sensibilidade do receptor, a configuração do sistema foi reajustada de acordo com a figura 6.4. Tendo em vista a aplicação em uma rede de acesso, inseriu-se 50 km de fibra no enlace, estando o atenuador em 12 dB, correspondente a relação 1/16. Assim, levantou-se a curva BER versus Potência de lançamento, com o objetivo de avaliar os efeitos de

16 Channels WDM- Coherent QPSK

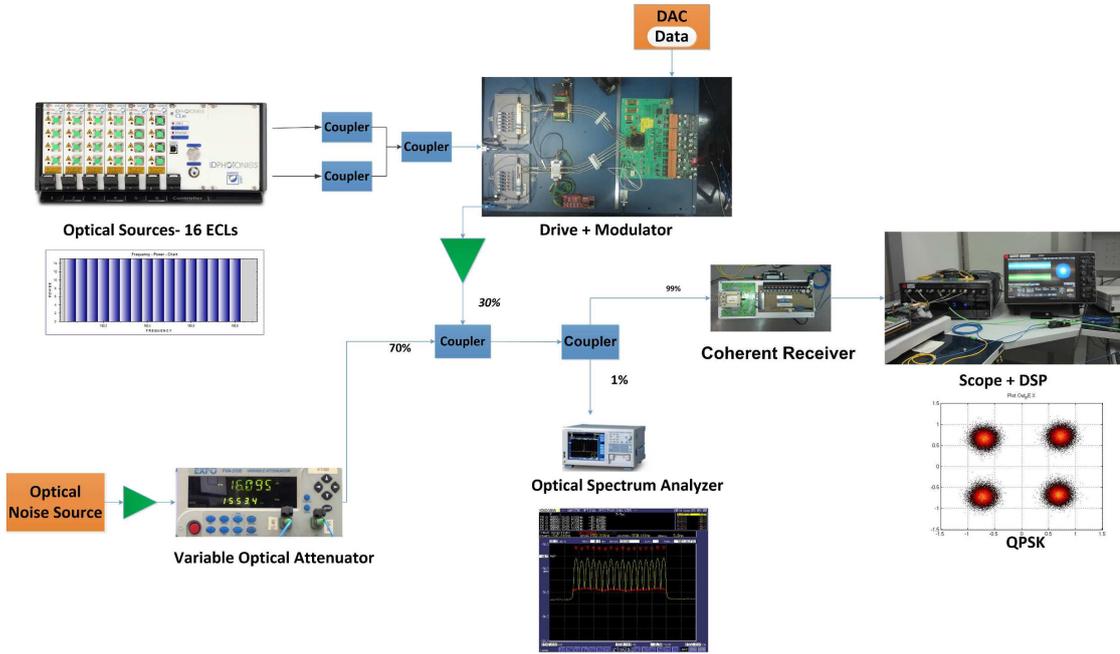


Figura 6.1: Implementação Laboratorial do Sistema 16 canais WDM-QPSK

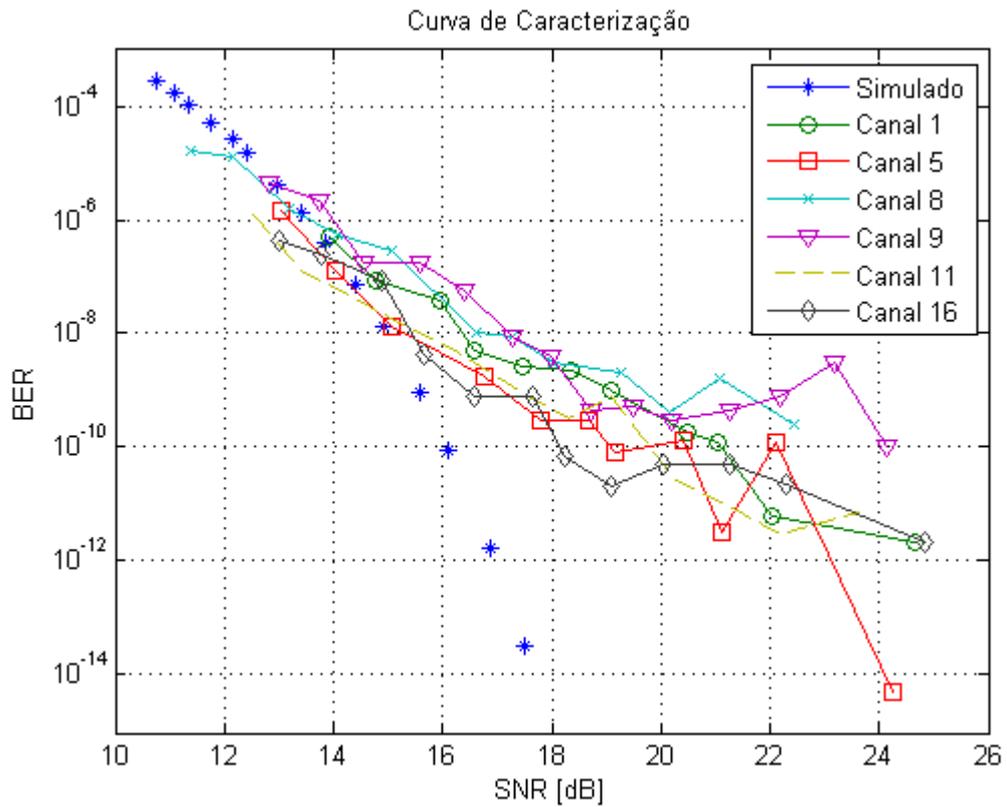


Figura 6.2: Caracterização transmissão 16 Canais WDM-QPSK

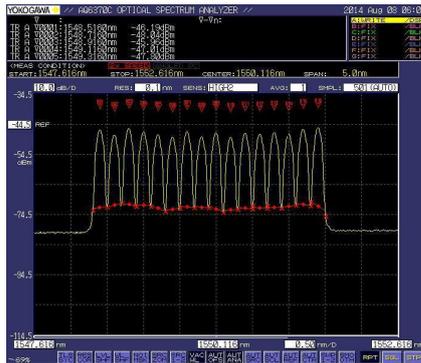


Figura 6.3: Espectro recebido 16 Canais WDM-QPSK

não linearidades na transmissão. Estes resultados são apresentados nas figuras 6.5 e 6.6. Como o módulo suporta a transmissão em duas polarizações, optou-se por enviar a mesma informação em ambas e considerar o resultado da transmissão em uma polarização como a média dos valores obtidos. Verificou-se que polarização Y apresentou resultados superiores a de X e uma das explicações desse fato decorre de falhas no ajuste das potências ou acoplamento.

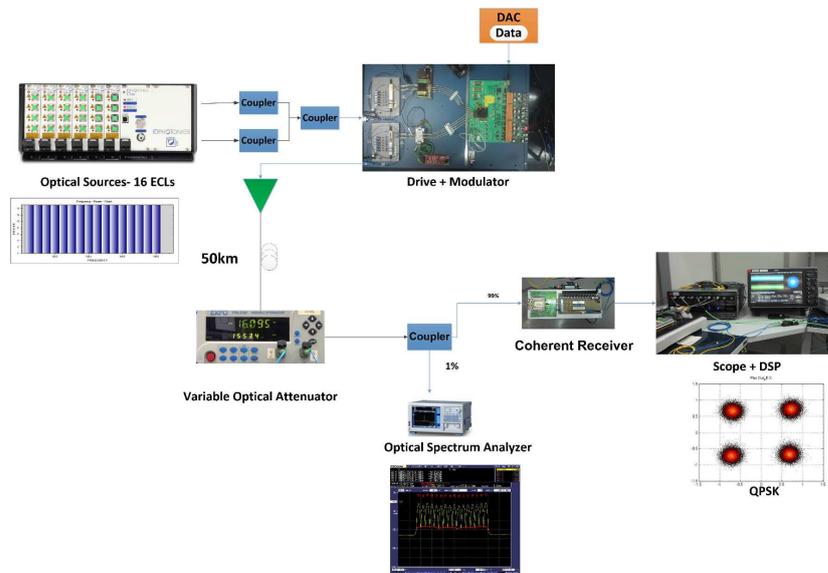


Figura 6.4: Configuração para avaliação da potência de lançamento

Para o espaçamento utilizado, não observou-se efeitos não lineares como XPM ou FWM, conforme destacado na seção 3.2. Esperava-se um perfil de curva em formato parabólico, porém a subida da curva com o aumento da potência não foi verificada mesmo para o caso da transmissão com 16 QAM (figura 6.7).

Considerando que os resultados proporcionam recuperação do sinal em níveis aceitáveis de BER e SNR, comprova-se a aplicabilidade do sistema WDM 16 canais QPSK em termos de sua utilização em redes de acesso. Neste cenário, são englobados 16 clientes finais com taxas de 20 Gbit/s, um valor superior ao que é negociado atualmente no mercado brasileiro e que atende as previsões de crescimento de demanda.

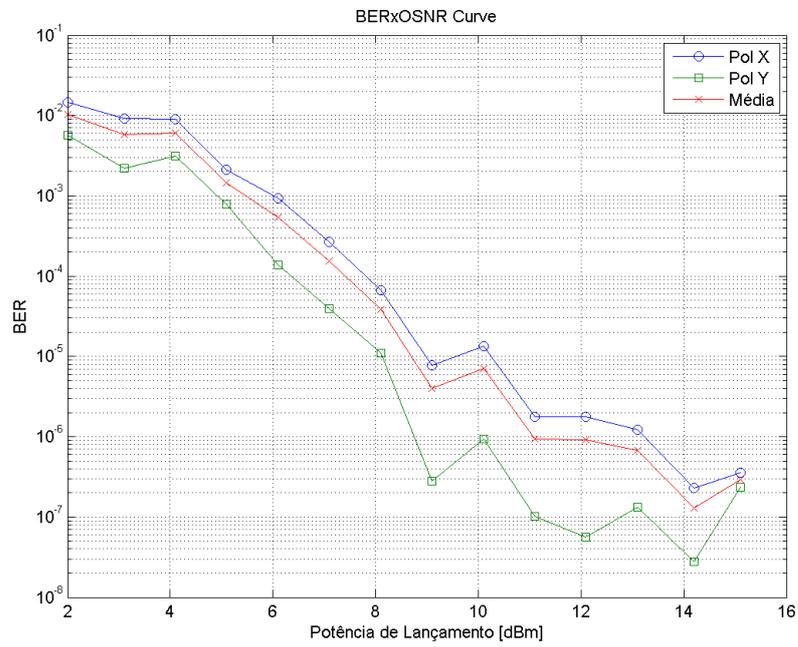


Figura 6.5: Avaliação com 50km de fibra

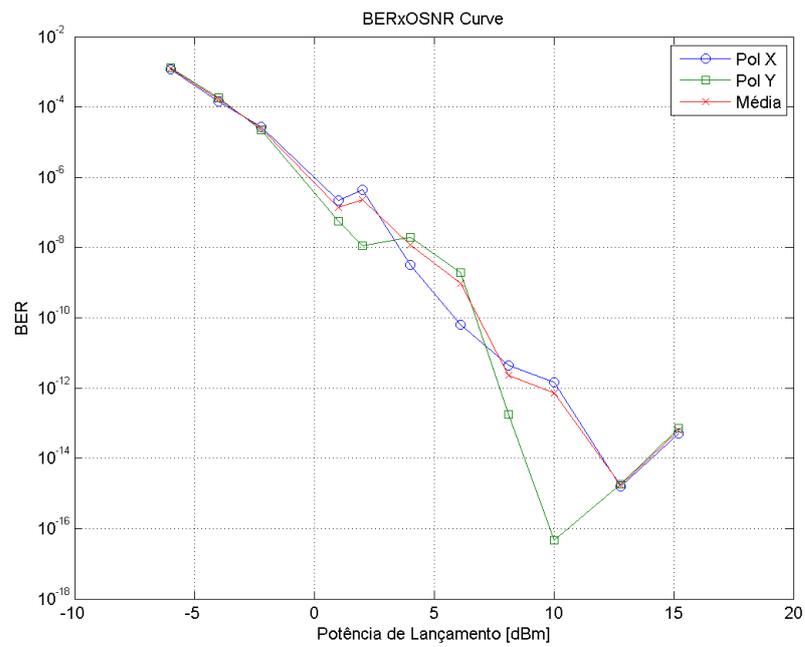


Figura 6.6: Avaliação em B2B

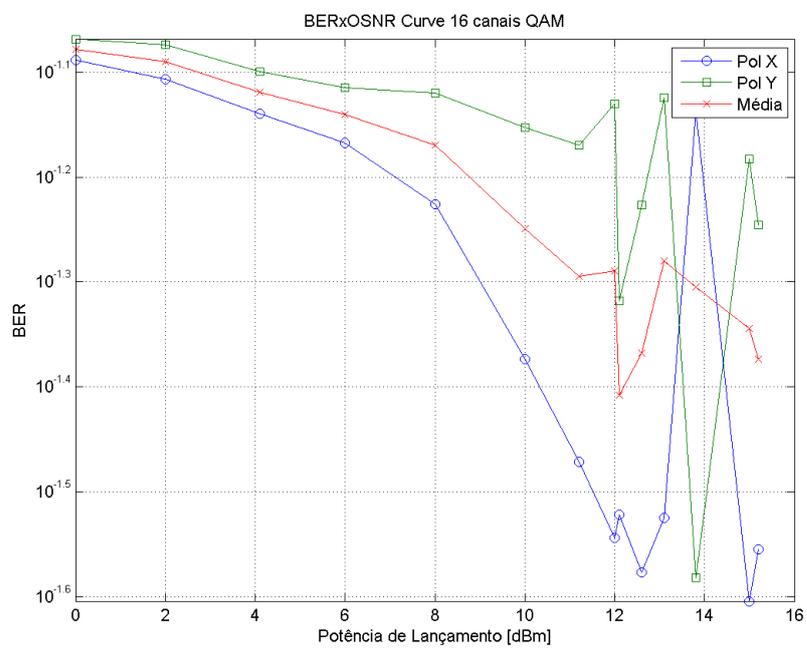


Figura 6.7: Avaliação potência de lançamento WDM 16 canais 16QAM

Capítulo 7

Conclusões

Neste trabalho, diferentes aspectos da arquitetura WDM aplicadas para redes de acesso de futura geração foram discutidos. Computacionalmente, foram analisados dois esquemas de transmissão, sendo um deles WDM puro e outro mais restritivo voltado para WDM Ultra Denso. A implementação laboratorial utilizou fibra DSF com 50 km com atenuação de 0,2 dB/km, modulador IQ, lasers de cavidade externa acoplados com transmissão no sentido rede-usuários com taxa de transmissão de 20 Gbit/s. Os resultados obtidos justificam a aplicação de WDM voltados para redes de acesso, provendo transmissão em altas taxas, máxima utilização do canal e robustez na transmissão. Considerando o UDWDM, a estrutura pode ser reajustada para atendimento a um maior número de usuários, dentro do compromisso do produto taxa vs distância. Comprovou-se computacional e experimentalmente a (i) eficiência espectral de uma rede com 20 Gb/s por usuário com espaçamento entre canais de 25 GHz e 3,125 GHz (simulado) (ii) aplicação de algoritmos de compensação dos efeitos de camada física a nível de DSP.

Referências Bibliográficas

- [1] AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. Hoboken. NJ: Wiley, 2002.
- [2] ATAI, V., TEMPRAMA, E. et al. **Flex-grid Compatible Ultra Wide Frequency Comb Source for 31.8 Tb/s Coherent Transmission of 1520 UDWDM Channels**. Optical Fiber Communication Conference, San Francisco-USA, artigo Th5B.7, Março de 2014.
- [3] BANERJEE, A. et al. **Wavelength- division multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review**. Journal of Optical Networking , 2005.
- [4] BENN, G. RATHORE, V. **Advances in DWDM Transmission Technologies**. OSA Seminar, 2014
- [5] CHANG. Gee-Kung et al. **Key Technologies of WDM-PON for Future Converge Optical Broadband Access Networks**. v.1. IEEE/OSA Journal of, agosto de 2009.
- [6] FARIAS, J. E. P. et al. **Cidades Inteligentes e Comunicações**. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação, p. 28-32, 2011
- [7] ITU-T Recommendation G.692 (1998), **Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers**. Extraído de: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.692-199810-I/en>. Acessado em: 17 de agosto de 2014.
- [8] ITU-T Recommendation G.694.1 (2012), **Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid**. Extraído de: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en>. Acessado em: 17 de agosto de 2014.
- [9] ITU-T Recommendation G.694.2 (2012) **Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid** . Extraído de: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.692-199810-I/en>. Acessado em: 17 de agosto de 2014.
- [10] KANEKO, Shin et al. **First λ - tunable Dynamic Load-Balancing Operation Enhanced by 3-msec Bidirectional Hitless Tuning on Symmetric 40-Gbit/s WDM/TDM-PON**. Optical Fiber Communication Conference, San Francisco-USA, artigo Th5A.4, Março de 2014.
- [11] KOROTKY, Steven. K. **Traffic Trends: Drivers and Measures of Cost-Effective and Energy-Efficient Technologies and Architectures for Backbone Optical Networks**. Los Angeles: IEEE/OSA OFC/NFOEC 2012, Março de 2012.
- [12] LIMA, I. A. **Simulação de tecnologias para redes de acesso faixa larga híbridas óptico-sem fio**. 53 pag. Trabalho de Conclusão de Curso- Engenharia Elétrica, UFCG, 2011.

- [13] PINTO, Thyago, FARIAS, Ewerton et al. **Arquiteturas e Aplicações de Rádio sobre Fibra**. Brasília: SBrT, 2012.
- [14] RAMASWAMI, Rajiv. **Optical Networks: A Practical Perspective**. 3rd Ed. Hardcover, Julho de 2009
- [15] REIS, Jacklyn. SHAHPARI, Ali, et al. **D.Design and Optimization Next Generation Passive All-Optical Networks**. Porto: Universidade de Aveiro, 2012.
- [16] REIS, Jacklyn. SHAHPARI, Ali, et al. **Analysis of Transmission Impairments on Terabit Aggregate PONs**. Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, USA, artigo OM2A5, 2013.
- [17] REIS, Jacklyn. SHAHPARI, Ali, et al. **Dowstream and Upstream Nyquist Band Optimization for Heterodyne Coherent PON**. Optical Fiber Communication Conference, San Francisco-USA, artigo W2A.25, Março de 2014.
- [18] REIS, Jacklyn. SHAHPARI, Ali, et al. **Nyquist Signaling for Spectrally-Efficient Optical Access Networks**. Optical Fiber Communication Conference, San Francisco-USA, artigo W3G.3, Março de 2014.
- [19] SEIMETZ, Matthias. **High Order Modulation for Optical Fiber Transmission**. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2009.