



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

## ANÁLISE DE DESEMPENHO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO ÓPTICA COERENTES

**Autor:** Thyago Monteiro Sá Pinto  
**Professor orientador:** Edmar Candeia Gurjão

Relatório de Estágio Integrado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade 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

ANÁLISE DE DESEMPENHO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO ÓPTICA  
COERENTES

Relatório de Estágio Integrado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Area de concentração: Telecomunicações

Orientador: Edmar Candeia Gurjão  
Supervisor do Estágio: Neil Guerrero Gonzalez

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2014

THYAGO MONTEIRO SÁ PINTO

ANÁLISE DE DESEMPENHO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO ÓPTICA  
COERENTES

Relatório de Estágio Integrado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade 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 José Ewerton Pombo de Farias, Dr.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Edmar Candeia Gurjão, Dr.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

## Agradecimentos

Trabalhar no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) se fez um sonho pra mim, desde que vi meu amigo Edson ir estagiar na empresa. Por ser uma meta definida de longo prazo, me permitiu trabalhar de forma direcionada para alcançar esse objetivo, porém o primeiro passo nessa direção só fez possível pelo intermédio do professor José Ewerton, que confiou no meu trabalho e fez a ponte entre o meu presente na graduação e o meu futuro na empresa.

No CPqD, tive a oportunidade de crescer muito como profissional e quero agradecer ao Luis Hecker e Júlio Diniz que me ofereçam a oportunidade, ao Jacklyn Dias por todas as orientações e ao gerente Neil Guerrero por ser fazer sempre tão acessível.

Aos meu amigos e colaboradores, Adriana, Anderson, Benjamin, Bruno, Caio, Camila, Cleiton, Diogo, Gabriel, Gabriel Neves, Israel, Paulo, Yésica, meus agradecimentos por terem me recebido de forma tão generosa e compartilhando tantas ideias e lições. Podem ter certeza que aprendi muito com cada um de vocês.

Ao meu orientador Edmar Candeia Gurjão, meu muito obrigado por todas orientações, muitas delas que estão além desse texto. O tenho como um exemplo de profissional e ser humano.

Por fim, quero registrar minha gratidão ao departamento de Engenharia Elétrica (DEE), a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao CPqD por me permitirem o desenvolvimento de competências, habilidades e capacidades. Instituições que estão na minha história e que serão lembradas como parte de grandes experiências da minha vida profissional e pessoal.

*Tudo o que é seu encontrará uma  
maneira de chegar até você.*  
*-Chico Xavier*

## Resumo

Neste relatório são descritas as atividades realizadas durante o período de estágio na Diretoria de Redes Convergentes (DRC) do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), entre os meses de maio e setembro de 2014. As atividades estão inseridas no âmbito dos projetos de pesquisa da empresa. O foco das descrições apresentadas neste texto se refere a avaliação de desempenho e análise de sensibilidade de sistemas de transmissão mono e multicanal, a partir de simulações com o *software Optical Simulator* e por meio da implementação laboratorial de sistemas de transmissão óptica. Além disso, a validação de uma rede com arquitetura baseada na técnica de multiplexação por comprimento de onda com espaçamento ultra denso (UDWDM) é apresentada tendo em vista sua aplicação em redes de acesso.

**Palavras-chave:** Transmissão óptica, CPqD, LASOR, UDWDM

## **Abstract**

In this report, the activities performed during the internship period on the Diretoria de Redes Convergentes (DRC) at the Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), between the months of May and September 2014, are described. The focus of the descriptions presented in this text refers to performance evaluation and sensitivity analysis of mono and multichannel transmission systems, from simulations with the Optical Simulator software and through laboratory implementation of optical transmission systems. In addition, the validation of a network architecture based on the technique of wavelength multiplexing with ultra dense spacing (UDWDM) is presented in view of its application in access networks.

**Keywords:** Optical Transmission, CPqD LASOR, UDWDM

# Lista de Figuras

2.1	Configuração básica de um sistema de transmissão com recepção coerente . . . . .	3
2.2	(a)Modular de fase (PM) (b)Modulador de Mach-Zehnder (MZM) [19] . . . . .	4
2.3	Modulador óptico IQ [19] . . . . .	5
2.4	Receptor coerente [19] . . . . .	5
2.5	Configuração do Receptor Coerente (RXn) . . . . .	6
2.6	Representação da transmissão em dupla polarização na fibra óptica . . . . .	6
2.7	Medição de PDL . . . . .	7
2.8	Arquitetura WDM . . . . .	7
2.9	Mistura de quatro ondas [9] . . . . .	9
3.1	Estrutura da caracterização . . . . .	10
3.2	Interface Labview . . . . .	11
3.3	Caracterização setup SNR=15.23 dB . . . . .	12
3.4	Caracterização setup SNR=29.75 dB . . . . .	12
3.5	Caracterização Polarização X . . . . .	12
3.6	Caracterização Polarização Y . . . . .	12
3.7	Validação laboratorial UWDWM bidirecional . . . . .	13
3.8	Efeitos de FWM no sinal usuário-rede . . . . .	14
3.9	Estrutura do Simulador . . . . .	15
3.10	Penalidades devido a PDL . . . . .	15
3.11	Setup experimental para caracterização do módulo e avaliação de desempenho do filtro otimizado . . . . .	17
3.12	Setup experimental da geração dos canais agressores e filtragem . . . . .	17
3.13	Espectro de entrada com utilização de filtro retangular . . . . .	18
3.14	Espectro de entrada com utilização de filtro gaussiano . . . . .	18
3.15	Constelação para utilização de filtro retangular . . . . .	18
3.16	Caracterização para utilização de filtro retangular, gaussiano e canal único Polarização X . . . . .	19
3.17	Caracterização para utilização de filtro retangular, gaussiano e canal único Polarização Y . . . . .	19

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	CPqD . . . . .	1
1.2	Objetivos do Estágio . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>3</b>
2.1	Sistemas de transmissão com recepção coerente . . . . .	3
2.2	Perda Dependente de Polarização (PDL) . . . . .	6
2.3	Multiplexação por divisão de comprimento de onda Ultra Denso (UDWDM) . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Atividades desenvolvidas</b>	<b>10</b>
3.1	Caracterização transmissão DP-QPSK 20 Gbaud . . . . .	10
3.2	Transmissão UDWDM . . . . .	12
3.3	Avaliação de PDL . . . . .	14
3.4	Otimização de desempenho de um sistema DP-QPSK 100G utilizando filtro óptico reconfigurável . . . . .	16
3.4.1	Objetivos do projeto . . . . .	16
3.4.2	Estrutura do experimento . . . . .	16
3.4.3	Caracterização . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Conclusões</b>	<b>20</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Estimativas apontam o crescimento do tráfego de dados nas redes de comunicação em torno de 38% ao ano [11]. Decorrente principalmente do aumento do número de usuários, demanda por maiores taxas de transmissão e qualidade em serviços de transporte de dados, esses fatos impulsionam o desenvolvimento de diversas pesquisas com o objetivo de atender as necessidades de mercado para sistemas de comunicações de próxima geração.

Atualmente, transmissão com dupla polarização, formatos de pulso Nyquist e o investimento de melhorias nas técnicas de processamento digital de sinais (DSP) se apresentam como alternativas consolidadas neste sentido. A combinação dessas técnicas com a utilização de filtros reconfiguráveis (com perfis de ganho ajustáveis ao sistema) e a técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda proporciona eficiência na utilização do espectro e melhoria nas características do sinal recebido.

Neste contexto, encontra-se o Laboratório de Sistemas Ópticos Reconfiguráveis (LASOR) do CPqD, no qual concentra-se o desenvolvimento de pesquisas inovadoras voltadas para o setor de comunicações ópticas. Algumas dessas pesquisas descritas neste relatório envolvem a utilização de filtros ópticos reconfiguráveis, transmissão WDM Ultra Denso com aplicações em redes de acesso e avaliação dos efeitos de *Polarization Dispersion Loss* (PDL) na transmissão em Dupla Polarização. Nas avaliações computacionais, utilizou-se o simulador *Optical Simulator*, desenvolvido no CPqD. Uma descrição dos esquemas experimentais e dos equipamentos utilizados também é realizada.

### 1.1 CPqD

O Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) é uma organização brasileira voltada para a inovação em Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC). Suas pesquisas envolvem sistemas de *software*, tecnologias de produtos, serviços tecnológicos e consultorias aplicadas para setores como comunicação e multimídia, financeiro, industrial, corporativo, defesa e segurança. A empresa possui o maior programa de pesquisa e desenvolvimento em TIs da América Latina e seus produtos são comercializados em forma de soluções e serviços ou transferência de tecnologias para a indústria.

Atualmente, as principais áreas em desenvolvimento na empresa são: comunicações ópticas, comunicações móveis e redes sem fio, plataformas IP, segurança da informação e comunicação, *smart grid*, redes de tecnologias e sensores, sistemas de suporte e operações e a negócios, gerenciamento da decisão, serviços, aplicações, terminais e inclusão digital.

Este trabalho de estágio foi realizado na Diretoria de Redes Convergentes (DRC) do CPqD, especificamente no Laboratório de Sistemas Ópticos Reconfiguráveis (LASOR), que está sob responsabilidade da Gerência de Transmissão Óptica (GTO).

## 1.2 Objetivos do Estágio

1. Análise de desempenho simulado e laboratorial de sistemas de transmissão óptica ;
2. Avaliação de efeitos dispersivos, perdas e não linearidades em sistemas de transmissão óptica.
3. Explorar o funcionamento dos principais dispositivos e equipamentos em um sistema com recepção coerente;
4. Avaliar os principais aspectos que comprometem a transmissão UDWDM;

## Capítulo 2

# Fundamentação Teórica

### 2.1 Sistemas de transmissão com recepção coerente

O esquema básico de um sistema de transmissão com recepção coerente pode ser observado na figura 2.1. Sua estrutura é geralmente composta do transmissor, canal e o receptor caracterizado pela presença de um oscilador local sintonizado em frequência idêntica ou próxima ao da portadora.

O principal componente do transmissor é a fonte, geralmente um laser para o caso de sistemas ópticos, cujo sinal é modulado e lançado sobre o meio fibra. Uma portadora ideal possui amplitude, frequência e fase constantes, porém na prática o sinal gerado pelo dispositivo é comprometido por variações, conforme pode ser verificado na equação 2.1. Além da potência  $P$  e fase  $\phi_s$  da portadora, também são consideradas flutuações em amplitude  $\delta P(t)$  e fase  $\phi_{\eta s}$ . Estas decorrem principalmente como resultado de emissão espontânea na qual fótons da camada de condução do material decaem em nível de energia, sendo lançados em direções e fases aleatórias o que repercute sobre os parâmetros da portadora.

$$\mathbf{E}_{cw}(t) = \sqrt{P_s + \delta P(t)} e^{j(\omega_s t + \phi_s + \phi_{\eta s}(t))} \quad (2.1)$$

Desconsiderando a variação de amplitude - também denominada ruído de intensidade- o espectro da portadora assume um formato lorentziano tal como definido na equação 2.2. Levando-se em conta essa função, defini-se a largura de linha do laser como a máxima banda para qual ocorre uma queda de 3 dB em relação ao valor máximo do sinal.

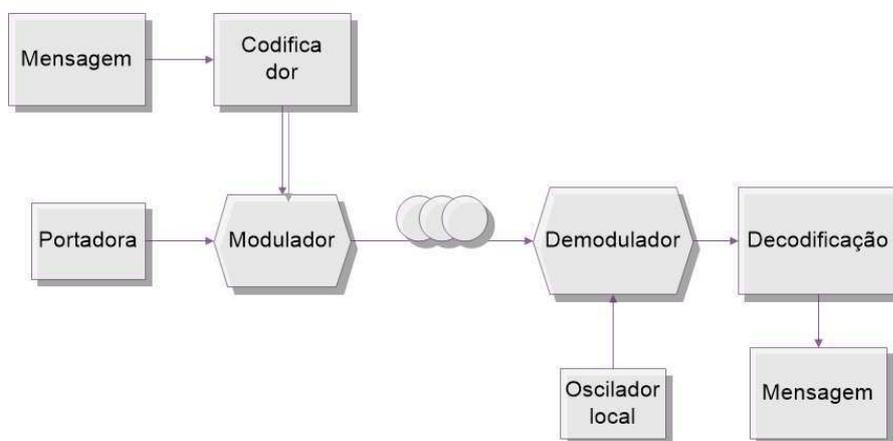


Figura 2.1: Configuração básica de um sistema de transmissão com recepção coerente

$$W_{E_{cw}}(w) = \frac{2t_c P_s}{1 + [(w - w_s)t_c]^2} \quad (2.2)$$

O ruído de fase possui forte influência sobre o desempenho da transmissão, principalmente para sistemas com detecção coerente. Especifica-se então o parâmetro de intensidade do ruído relativo (PIN) que estabelece a relação entre a variância das flutuações e a potência média do sinal.

$$\int_0^{\delta f} RIN(f)df = \frac{\langle \delta P^2(t) \rangle^2}{\langle P(t) \rangle} \quad (2.3)$$

A portadora é acoplada ao sinal mensagem utilizando dispositivos moduladores, e então são lançados pela fibra. O processo de modulação pode ocorrer de forma direta (dado modulado pela corrente do laser) ou externa, na qual utiliza-se um dispositivo interferômetro entre os dois sinais. As estruturas fundamentais para modulação externa são os moduladores de fase (PM), modulador de Mach-Zehnder (MZM) e modulador IQ.

Moduladores de fase baseiam-se na variação do índice de refração do material quando submetido a uma tensão externa. A mudança de fase provocada  $\phi_{PM}(t)$  é definida como uma função do comprimento de onda  $\lambda$ , o comprimento efetivo do eletrodo  $l_{el}$  sob o qual a tensão é aplicada e a mudança no índice de refração efetivo do material  $\Delta n_{eff}(t)$ . Dessa forma, a relação entre o campo óptico da portadora  $E_{in}(t)$  e o sinal modulado em fase é representada na equação 2.5.

$$\phi_{PM}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{eff}(t) l_{el} \quad (2.4)$$

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) e^{j\phi_{PM}(t)} = E_{in}(t) e^{j \frac{u(t)}{V_\pi} \pi} \quad (2.5)$$

O mesmo princípio pode ser utilizado para modulação em intensidade, reajustando a estrutura do modulador em fase em um formato dual (figura 2.2), conhecida como modulador de Mach-Zehnder. O sinal é dividido em dois caminhos, ambos com a presença de um modulador, e então recombinados na saída representada pela equação 2.6.

$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = \frac{1}{2} (\exp j\phi_1(t) + \exp j\phi_2(t)) \quad (2.6)$$

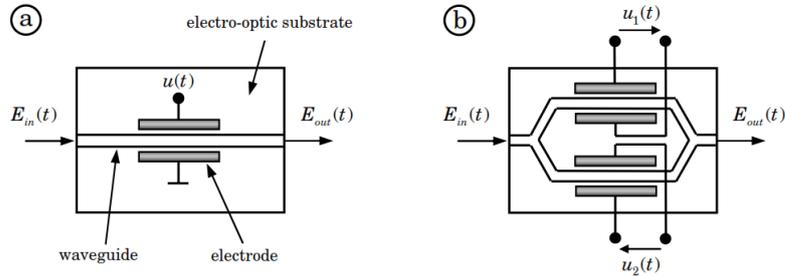


Figura 2.2: (a) Modulador de fase (PM) (b) Modulador de Mach-Zehnder (MZM) [19]

A combinação de dois moduladores Mach-Zehnder e um em fase resulta na configuração de um modulador IQ (figura 2.3). Este permite a modulação de duas componentes, sendo um em fase e outro em quadratura. Por estarem deslocados de  $\pi/2$ , estes sinais podem ser transmitidos pelo canal sem interferência. A função de transferência do modulador IQ pode ser observada na equação 2.7

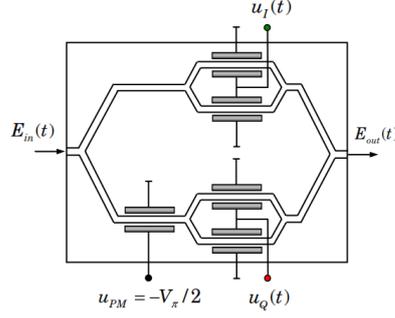


Figura 2.3: Modulador óptico IQ [19]

$$\frac{E_{out}(t)}{E_{in}(t)} = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\phi_I(t)}{2}\right) + j\frac{1}{2} \cos\left(\frac{\Delta\phi_Q(t)}{2}\right) \quad (2.7)$$

Após o transporte pela fibra óptica, o sinal recebido é acoplado ao gerado pelo oscilador local e depois recombinados para produzir a fotocorrente que será utilizada na identificação do sinal. Os campos na entrada do acoplador são definidos pelas equações 2.8 e 2.9, 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,  $\phi_s$  e  $\phi_{lo}$  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.

O batimento dessas funções gera então a corrente resultante da equação 2.10, na qual  $i_{sh}$  é a corrente de ruído balístico (variações) 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. Esta é a relação entre a corrente gerada no receptor e a potência incidente.

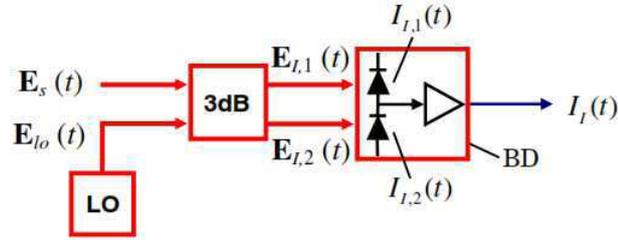


Figura 2.4: Receptor coerente [19]

$$E_s(t) = \sqrt{P_s} e^{j(w_s t + \phi_s)} a(t) e^{j\phi(t)} e^{j\phi_{\eta s}(t)} \mathbf{e}_s \quad (2.8)$$

$$E_{lo}(t) = \sqrt{P_{lo}} e^{j(w_{lo} t + \phi_{lo})} a(t) e^{j\phi_{\eta lo}(t)} \mathbf{e}_{lo} \quad (2.9)$$

$$I_I(t) = 2R\sqrt{P_s P_{lo}} a(t) \mathbf{e}_s \mathbf{e}_{lo} \sin[\Delta w t + \phi_\eta(t) + \phi_0(t)] + i_{sh} \quad (2.10)$$

No caso da detecção de componentes em fase e quadratura, a organização da figura 2.4 pode ser reajustada conforme apresentado na figura 2.5. Os sinais recebido e do oscilador local são superpostos utilizando um dispositivo denominado híbrida, que age separando as componentes em cada polarização. As duas correntes geradas são definidas como funções ortogonais (equações 2.11 e 2.12), nas quais  $i_{shI}$  e  $i_{shQ}$  são as correntes de ruído balístico de cada componente.

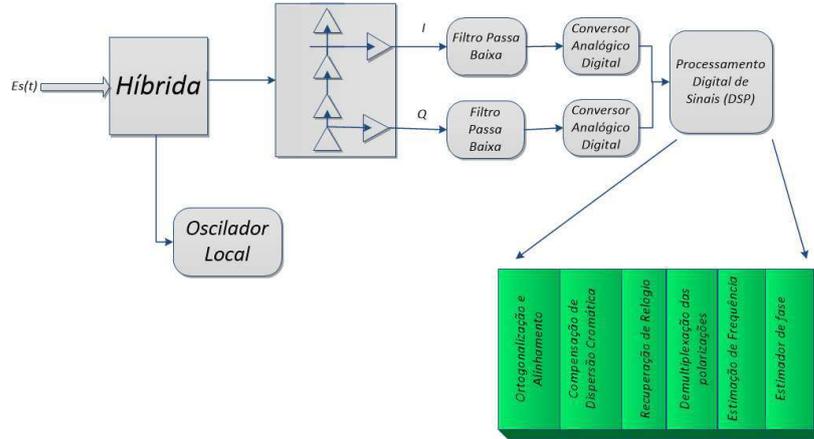


Figura 2.5: Configuração do Receptor Coerente (RXn)

$$I_I(t) = R\sqrt{P_s P_{lo}} a(t) \mathbf{e}_s \mathbf{e}_{lo} \cos[\Delta\omega t + \phi_\eta(t) + \phi_0 + \phi(t)] + i_{shI} \quad (2.11)$$

$$I_Q(t) = R\sqrt{P_s P_{lo}} a(t) \mathbf{e}_s \mathbf{e}_{lo} \sin[\Delta\omega t + \phi_\eta(t) + \phi_0 + \phi(t)] + i_{shQ} \quad (2.12)$$

## 2.2 Perda Dependente de Polarização (PDL)

De acordo com a teoria eletromagnética, polarização descreve relações fixas de fase para as diversas componentes transversais do campo gerado pela onda se propagando. Assim, pode-se selecionar uma polarização específica de forma a manter a transmissão da onda em apenas uma direção. No caso de sistemas ópticos com dupla polarização, opta-se pela seleção dos campos transversais elétricos (TE) e magnéticos (TM), viabilizando a transmissão simultânea com o dobro da taxa quando comparado com transmissão de polarização única.

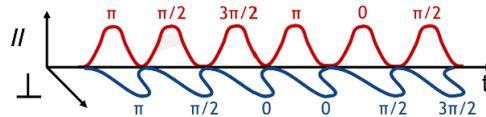


Figura 2.6: Representação da transmissão em dupla polarização na fibra óptica

Devido a ortogonalidade, a transmissão DP deveria implicar em interferência mínima entre polarizações, porém o sistema não se mantém linear ao longo do enlace e na prática verifica-se interferências devido a dispersão de modo (PMD) e perda dependente de polarização (PDL). A PMD é definida como a diferença de tempo de chegada no receptor para polarizações distintas e tem como principal consequência o espalhamento do pulso, interferência intersimbólica e aumento do valor da taxa de erro de bit (BER).

A PDL é a medida que relaciona a diferença do valor de pico-a-pico da potência na saída do dispositivo sob teste, levando em consideração todas as possíveis polarizações suportadas pelo componente. Seu cálculo é realizado de acordo com a equação 2.13.

$$PDL_{dB} = 10 \log \frac{P_{max}}{P_{min}} \quad (2.13)$$

Os dispositivos mais comuns que exibem PDL são acopladores, isoladores, multiplexadores (WDM) e fotodetectores. Existem diversos dispositivos para medição de PDL. A técnica fundamental consiste na exposição do dispositivo sob teste às polarizações em análise e com isso medir-se a potência na saída do dispositivo. Com os valores de máximo e mínimo, realiza-se o cálculo da equação 2.13. Um exemplo desse tipo de medição pode ser observado na figura 2.7.

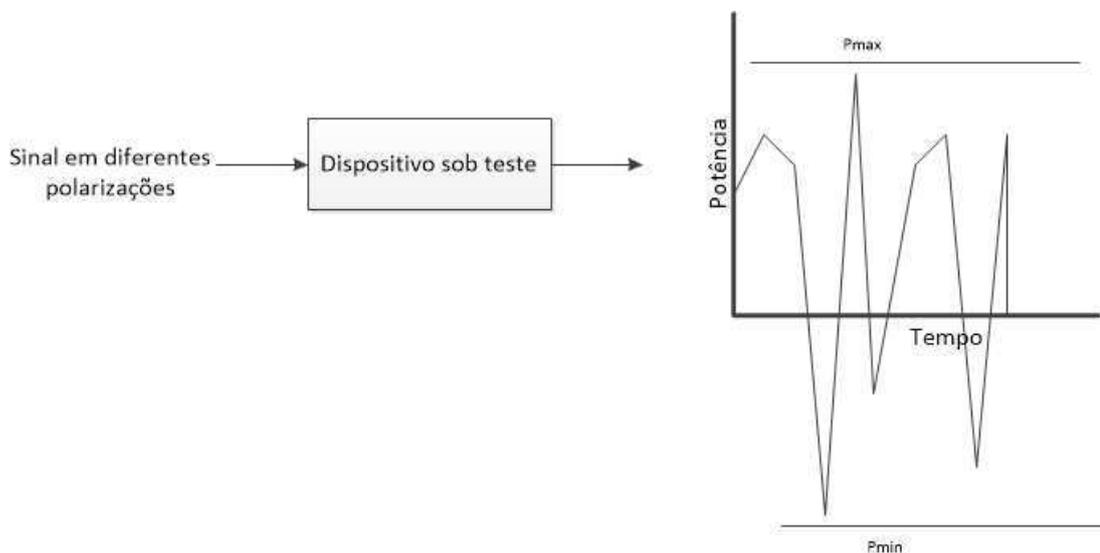


Figura 2.7: Medição de PDL

### 2.3 Multiplexação por divisão de comprimento de onda Ultra Denso (UDWDM)

A técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda é tida como uma alternativa no sentido de atender as expectativas de crescimento de tráfego de dados na rede. Considerando sua estrutura convencional, essa tecnologia está organizada conforme exemplificado na figura 2.8. Em cada transmissor, sinais mensagem são gerados e modulam uma portadora em frequência especificada. Esses sinais ópticos modulados são então combinados em um único feixe por meio de um multiplexador, e passam pelo circulador óptico cuja principal função é a de separar os sinais no sentido rede-usuários dos sinais em sentido contrário. Após o transporte pela fibra, o sinal passa por outro circulador no estágio de recepção, um demultiplexador e então chegam aos usuários. Nesta etapa, pode-se utilizar detecção direta ou coerente.

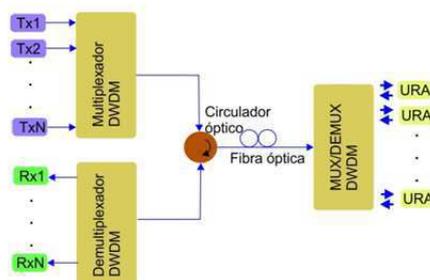


Figura 2.8: Arquitetura WDM

As principais vantagens de WDM envolvem o não compartilhamento de janelas temporais

como na técnica de multiplexação por divisão de tempo (TDM), melhoria na eficiência espectral, escalabilidade e flexibilidade em termos de taxas e formatos de modulação, porém algumas limitações também são consideradas como a alocação exclusiva de banda para o usuário. Em aplicações para redes de acesso (interface final rede usuário), questiona-se principalmente o custo de utilização de um oscilador local no estágio de recepção, um recurso que aumenta a sensibilidade do receptor e permite a transmissão de formatos de modulação avançados e conseqüentemente melhor utilização da capacidade do canal.

O uso de WDM flexível é tido como uma maneira de lidar com a limitação de banda dedicada. Normalizada pela ITU G692.1 [8], sua premissa baseia-se em uma utilização dinâmica do espectro, de forma que a largura de banda é alocada conforme a demanda do usuário final, porém essa alternativa, depende de lasers ajustáveis no receptor. Resultados envolvendo alocação dinâmica de comprimento de onda são apresentados por Kaneko (2014). De acordo com Banerjee (2014), a combinação de WDM flexível com pulsos em formato Nyquist é a direção em termos de sistemas WDM de próxima geração. Resultados alcançados por Reis (2012) demonstram que a utilização desse formato de pulso, implica em um combate efetivo a reflexões de sinais em sentidos contrários na fibra em comparação com o pulso NRZ ( Não Retorno ao Zero).

Em uma evolução da técnica, tem-se o WDM Ultra Denso (UDWDM) que utiliza espaçamentos entre canais mais restritivos. A limitação dessa configuração reside sobre os efeitos não lineares que passam a comprometer o desempenho da transmissão conforme aumenta-se a potência de lançamento na fibra. Porém, baixos valores de potência na recepção não viabilizam a identificação adequada da mensagem. Os principais efeitos não lineares considerados são auto modulação de fase (SPM), modulação de fase cruzada (XPM) e mistura de quatro ondas (FWM). Estas são causadas, pois para elevados valores de potência, o índice de refração da fibra é caracterizado pela adição de um fator não linear e influenciado pela potência e area efetiva da fibra. Essa não linearidade provoca variação na constante de propagação que por sua vez repercute sobre a variação de fase  $\phi_{NL}$ , resultando em SPM. A principal consequência desta não linearidade é o espalhamento e alteração do formato do pulso, o que reduz a eficiência espectral.  $L_{eff}$  é comprimento efetivo de interação da fibra,  $\lambda$  é a constante de não linearidade e  $P_{in}$  é a potência de entrada.

$$\phi_{NL} = \lambda P_{in} L_{eff} \quad (2.14)$$

Em sistemas multicanais, essa variação de fase é influenciada com o dobro da potência dos demais canais no meio, conforme pode ser observado na equação 2.15 (XPM). Já a mistura de quatro ondas 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. A geração dessa nova onda contribui para os efeitos de XPM.

$$\phi_j = \gamma L_{eff} \left( P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right) \quad (2.15)$$

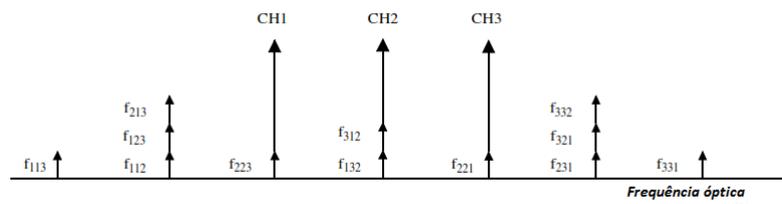


Figura 2.9: Mistura de quatro ondas [9]

## Capítulo 3

# Atividades desenvolvidas

### 3.1 Caracterização transmissão DP-QPSK 20 Gbaud

A caracterização da transmissão óptica se refere a uma avaliação da sensibilidade do receptor em termos da curva BER x SNR, na qual obtêm-se a potência mínima com a qual o sinal pode ser recebido e devidamente identificado.

Para a caracterização de um sistema monocanal, utilizou-se a estrutura apresentada na figura 3.1. No transmissor, um laser de cavidade externa (ECL), sintonizado na frequência de 193,4 THz, largura de linha de 100kHz e com potência de 16 dBm é utilizado 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. Estes são enviados para um Conversor Analógico Digital, amplificados e então aplicados em um modulador IQ. Após a pré-amplificação (Buster), ao sinal modulado é adicionado uma parcela de ruído de emissão espontânea (ASE), gerado por um amplificador em sequência com um atenuador variável que permite o ajuste da relação sinal ruído (SNR) na recepção.

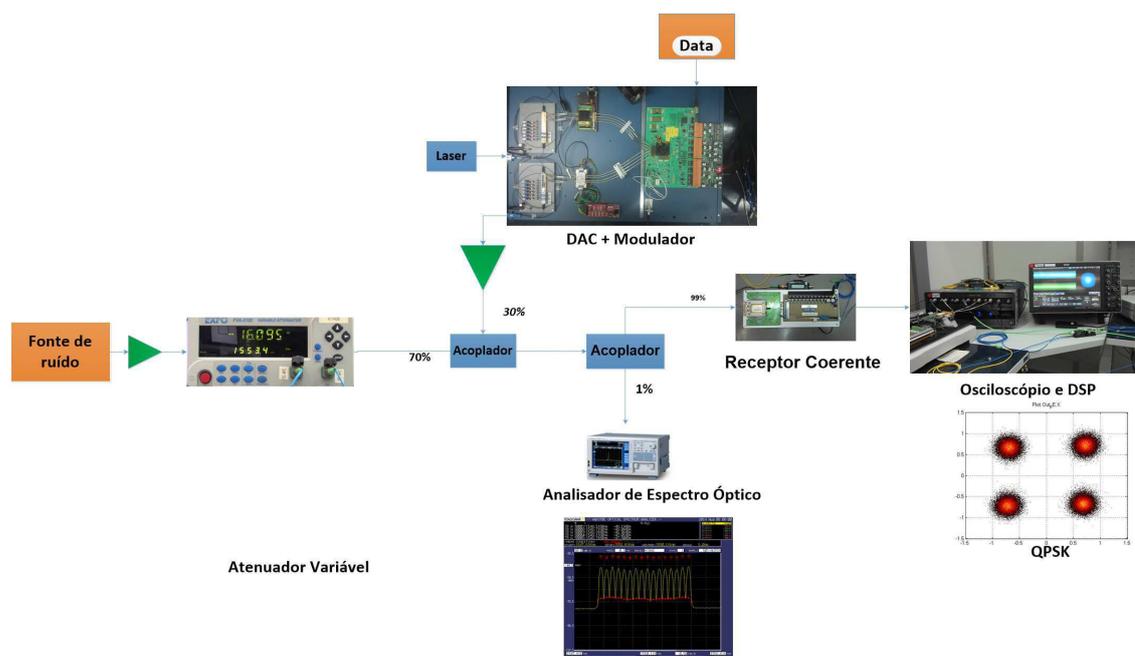


Figura 3.1: Estrutura da caracterização

A parcela de ruído é alterada via uma interface LabView (figura 3.2) que controla de forma gradativa a SNR na recepção por meio da atenuação do ruído. Este programa também extrai dados do Analisador de Espectro (OSA) e do DSP após o receptor coerente, armazenando os valores de potência do sinal em uma faixa ampla de frequências. A caracterização é realizada partindo-se desses dados que são processados *off-line*, permitindo a obtenção da curva BER x SNR.

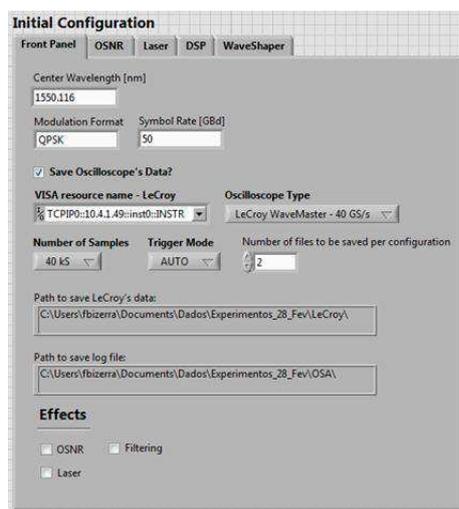


Figura 3.2: Interface Labview

O sinal recebido é sobreposto ao oscilador local no módulo receptor (híbrida), ambos com mesmo comprimento de onda e potências de -4 dBm e +4 dBm, respectivamente. Na saída do módulo, tem-se quatro sinais, sendo fase (I) e quadratura (Q) para as duas polarizações. Estes são aplicados a um osciloscópio de amostragem para processamento digital e análise do diagrama de constelação. Foram utilizados um osciloscópio de 30 GHz de banda e 40 Gamostras/s, atenuadores variáveis e um laser sintonizável de cavidade externa (oscilador local) na mesma frequência da portadora. As amostras coletadas dos quatro canais possuíam 800 mil amostras por canal.

Nas figuras 3.3-3.6, observa-se os resultados obtidos a partir dos dados armazenados pelo caracterizador. Nas figuras 3.5 e 3.6, verifica-se a avaliação de sensibilidade por polarização. Com uma curva decrescente, como era de se esperar, os valores de BER obtidos são quantitativamente melhores conforme aumenta-se a SNR. O importante a se destacar é que, para este esquema implementado, com SNR mínima em torno de 16 dBm ainda consegue-se a recuperação do sinal por meio da aplicação de códigos corretores de erro (FEC), visto que acima deste ponto obtêm-se valores de BER inferiores a  $10^{-3}$ , estabelecido como limite máximo deste parâmetro para que o sinal possa ser identificado. Uma análise comparativa das duas figuras também permite observar que na polarização Y obteve-se desempenho superior. A isso atribui-se falhas de acoplamento ao longo do sistema, birrifringência entre outros fatores. Estes fatos são reforçados pela observação das constelações recuperadas na etapa de processamento, figuras 3.3 3.4.

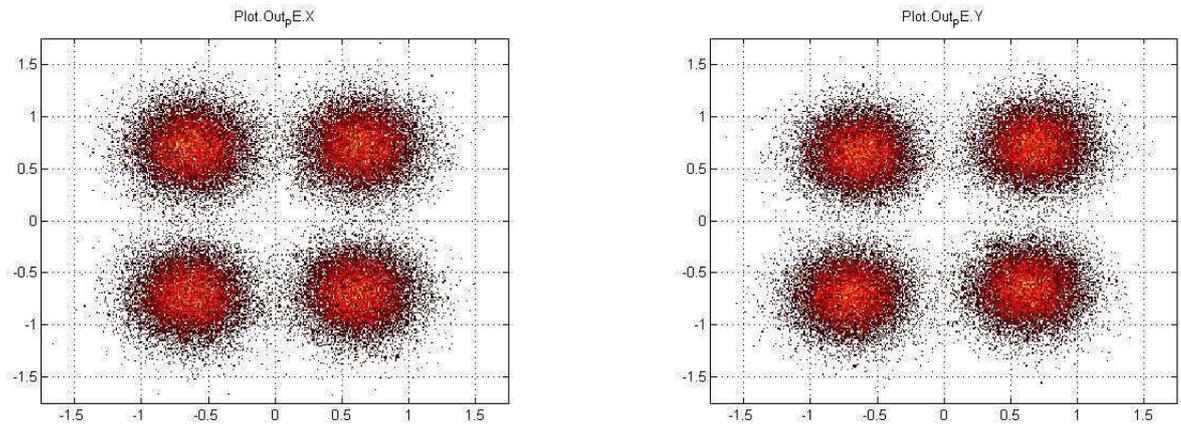


Figura 3.3: Caracterização setup SNR=15.23 dB

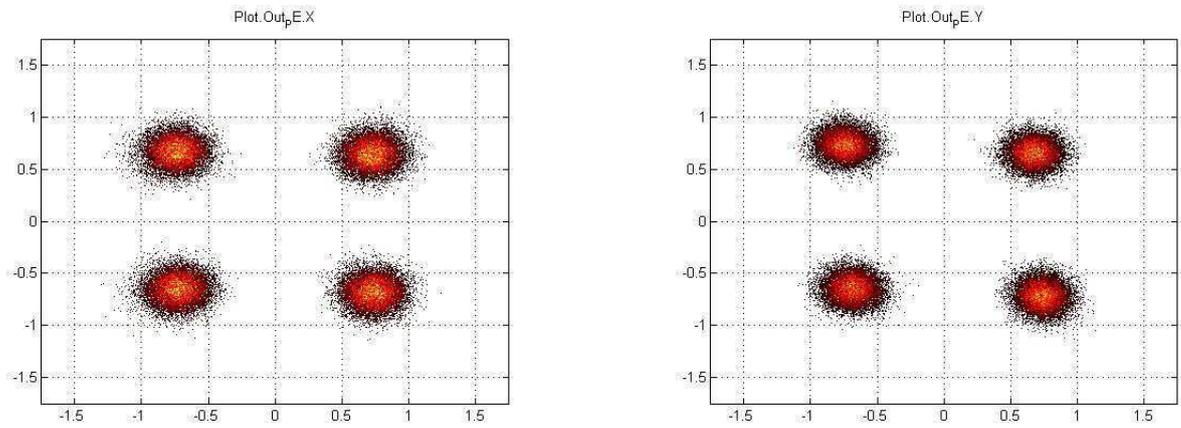


Figura 3.4: Caracterização setup SNR=29.75 dB

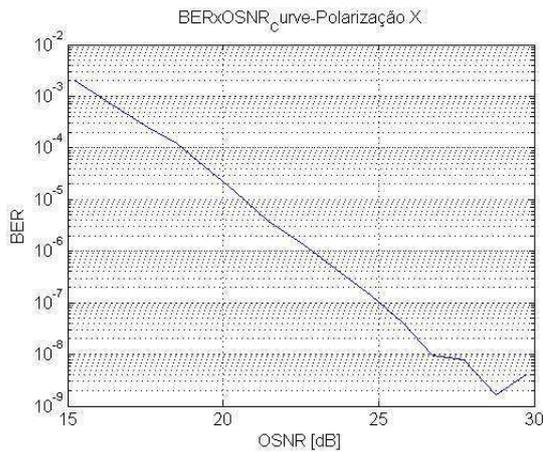


Figura 3.5: Caracterização Polarização X

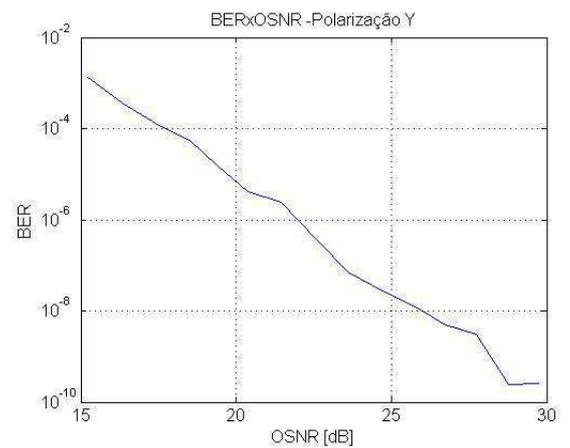


Figura 3.6: Caracterização Polarização Y

### 3.2 Transmissão UDWDM

A avaliação de desempenho de um sistema WDM ultra denso foi realizada considerando a transmissão de 16 canais, sendo 8 no sentido central-cliente (*downstream*) e 8 no sentido contrário

(*upstream*), com formato de modulação óptica DP-16 QAM a uma taxa real de 10Gbps por canal. A estrutura laboratorial utilizada está disposta na figura 3.7.

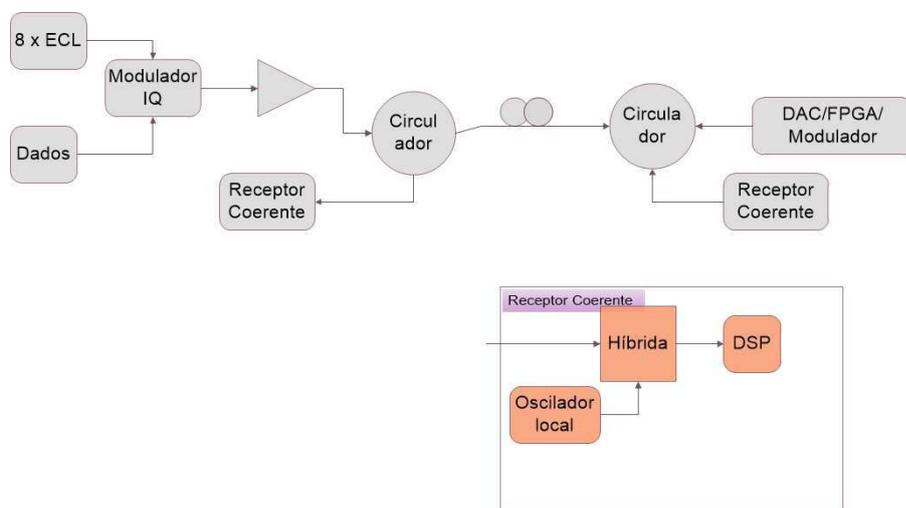


Figura 3.7: Validação laboratorial UWDWM bidirecional

Na geração do sinal *downstream*, uma sequência de dados aleatórias é gerada em um Arranjo de Portas Programável em Campo (FPGA), sendo repassados em sequência a um filtro de Nyquist, gerando um pulso em formato de cosseno levantado com queda de 0,1. Este formato de pulso foi escolhido por minimizar os efeitos reflexivos entre sinais *upstream* e *downstream* durante a transmissão, fator demonstrado por Reis (2012). No modulador IQ, estes sinais são modulados por um conjunto de 8 lasers de cavidade externa, com largura de linha de 100 kHz e espaçados entre si de 5 GHz em torno da frequência central de 193, 27 THz. O sinal multiplexado passa por um controle de polarização, um amplificador e um atenuador variável cuja principal função é permitir o ajuste da potência de lançamento.

Nesta etapa, um circulator com perda de 1 dBm age no sentido de selecionar entre o sinal a ser enviado ou o transmitido pelo usuário. O alcance da fibra foi de 50 km, correspondente a aplicações em redes de acesso.

Na geração do sinal correspondente aos usuários, uma sequência de dados aleatórios é modulada por um conjunto de oito ECLs, com larguras de linha de 100 kHz, espaçados de 5 GHz porém deslocados em cerca de 2,5 GHz em relação aos sinais *downstream*. Ou seja, as frequências disponíveis para transmissão do sinal por parte do usuário são geradas em pontos médios as utilizadas pela central de comutação de dados. 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. Estes são enviados para o DAC, amplificados e então aplicados em um modulador IQ. O conjunto de sinais modulados é lançado com potência de 3 dBm, passam por um circulator óptico com perda de 1 dBm e então são lançados na fibra.

Devido a disponibilidade estrutural, o mesmo receptor foi utilizado de forma alternada na avaliação da transmissão em ambas as direções. O sinal recebido é sobreposto ao oscilador local no módulo receptor com uma frequência próxima ao canal em análise (recepção coerente heteródina). O batimento entre os sinais permite a detecção em uma frequência intermediária. São obtidos quatro sinais, sendo fase (I) e quadratura (Q) para as duas polarizações. Estes foram aplicados a um osciloscópio de amostragem para processamento digital *off-line* e análise do diagrama de constelação. O osciloscópio possui 30 GHz de largura de banda e amostragem na ordem de 40 Gamostras/s. Atenuadores variáveis foram utilizados na entrada do oscilador local e do receptor, neste caso para simular o divisor de potência assim como permitir a avaliação da

sensibilidade do dispositivo.

As análises realizadas foram:

- Sensibilidade do receptor por meio da curva BER x SNR;
- Avaliação dos efeitos reflexivos do sinal *upstream* sobre o sinal *downstream*, a partir da curva Potência de lançamento do sinal *usptream* x SNR;
- Avaliação da influência de efeitos não-lineares, a partir da curva Potência de lançamento do sinal *downstream* x SNR;

Até o momento da escrita deste relatório, esses resultados ainda não haviam sido processados, porém uma análise prévia demonstra a eficiência da utilização do formato de pulso Nyquist em comparação ao NRZ no que tange a mitigação de efeitos reflexivos devido a transmissão bilateral. Além disso, verifica-se a degradação do sinal conforme aumenta-se a potência de lançamento por canal, devido principalmente aos efeitos não lineares. Um exemplo da formação de mistura de quatro ondas para o experimento citado, pode ser observado pelo espectro do sinal usuário-rede da figura 3.8.



Figura 3.8: Efeitos de FWM no sinal usuário-rede

### 3.3 Avaliação de PDL

A avaliação de desempenho quando sob efeito de PDL foi realizada para um módulo 128 Gbit/s DP-QPSK com taxa de transmissão de 28 Gbaud. Fixou-se a princípio os valores de PDL em 1 dB, 2 dB, 3 dB e 5 dB, sendo estes simulados pela variação de potência dos sinais em cada polarização. Utilizou-se o programa *Optical Simulador* como interface de aplicação, cuja a estrutura pode ser observada na figura 3.9.

No transmissor, um conjunto de sinais aleatórios são gerados pelo DAC (*Digital Analog Converter*). O sinal modula uma portadora, um laser sintonizado na frequência de 193,35 THz e largura de linha de 300 kHz. O laser possui fase zero e ruído de intensidade. O modulador IQ recebe sinais em fase e quadratura com formato de pulso definido NRZ sendo seguido de um filtro de alta ordem.

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 pela hídrida, 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. Assim, 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.

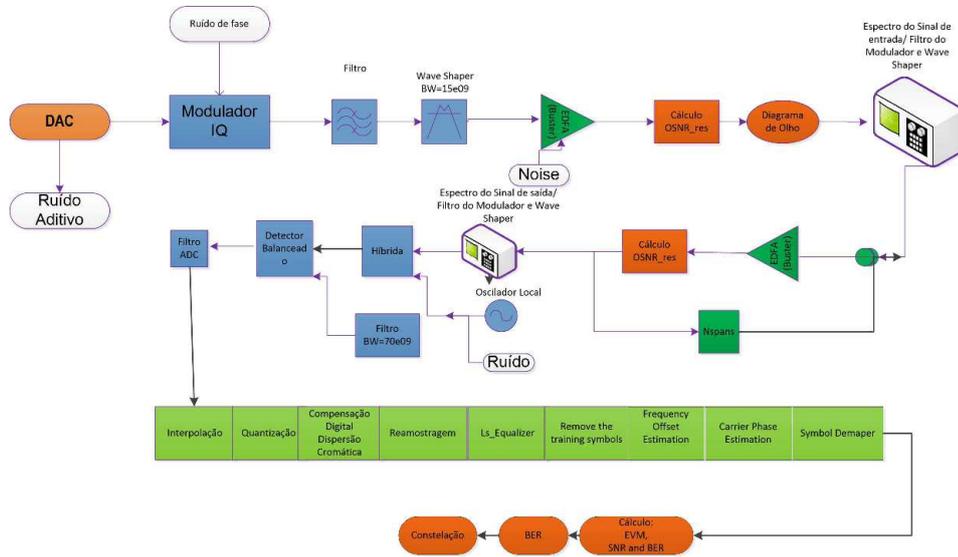


Figura 3.9: Estrutura do Simulador

Na figura 3.10, observa-se o comparativo entre os valores de PDL de interesse. Considerando o limite dos códigos corretores de erro (FEC) na ordem de  $10^{-3}$ , verificou-se que as penalidades em função de PDL em relação aos sinal de referência para o dispositivo sobre teste se encontram aceitáveis para a aplicação. Na tabela 3.2, esses valores estão representados. A penalidade máxima foi de 3,13 dB para uma PDL de 5 dB, enquanto que para 1 dB desta obteve-se 0,46 dB.

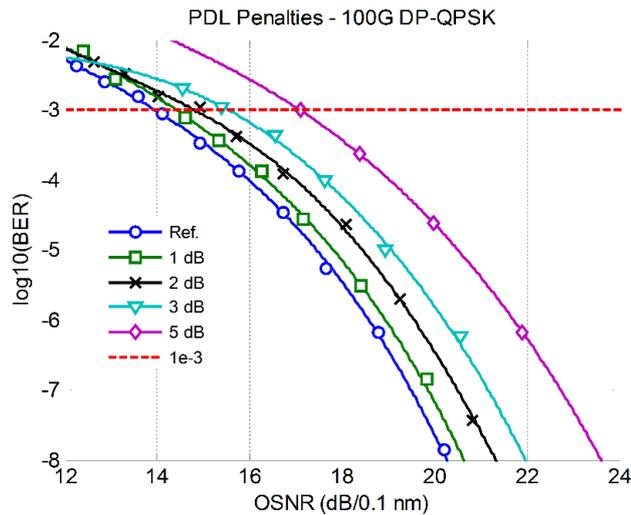


Figura 3.10: Penalidades devido a PDL

PDL [dB]	OSNR [dB]
Referência	13,94
1	14,40
2	14,79
3	15,52
5	17,07

Tabela 3.1: OSNR correspondente ao limite de FEC

PDL [dB]	Penalidade [dB]
1	0,46
2	0,85
3	1,58
5	3,13

Tabela 3.2: Penalidade devido a PDL correspondente ao limite de FEC

## 3.4 Otimização de desempenho de um sistema DP-QPSK 100G utilizando filtro óptico reconfigurável

### 3.4.1 Objetivos do projeto

- Estudar o impacto da pré-filtragem óptica e a sua otimização em um sistema submarino DWDM 40x100G por meio de realizações de experimentos no ambiente de laboratório, que incluam transmissão de múltiplos canais, considerando os efeitos de transmissão de um sistema real.
- Desenvolver algoritmo de otimização de filtragem óptica multicanal, baseado no algoritmo genético.

### 3.4.2 Estrutura do experimento

O *setup* para caracterização do módulo 100G Civcom foi realizado conforme esquemático da figura 3.11, enquanto a montagem dos canais agressores foi concluída segundo o organizado na figura 3.12. Para a análise de desempenho da filtragem óptica otimizada, foi utilizado um transponder coerente com formato de modulação óptica DP-QPSK a uma taxa real de 128 Gbps, desenvolvido para aplicações DWDM. O transmissor possui potência de saída de 0dBm, largura de linha de 100kHz e foi sintonizado para o comprimento de onda de 1544,07 nm. O sinal é enviado para um amplificador óptico e segue para um filtro óptico programável (*Programmable Optical Filter*, POF) de portas 4x1 com controle digital de frequência, amplitude, fase e banda. Os parâmetros otimizados neste trabalho são largura de banda, atenuação central do filtro e atenuação em ponto médio, segundo o critério de minimização da BER, obtida como produto final do processamento digital off-line. Parte do sinal filtrado segue em direção a fibra e parte segue para o analisador de espectro óptico (*Optical Spectrum Analyzer*, OSA), com proporção 9:1. Um amplificador em saturação e um atenuador variável são utilizados para manter a potência lançada na rede constante.

### 3.4.3 Caracterização

O sistema da figura 3.11 foi simulado utilizando o *software Optical Simulator* (CPqD), para dois tipos de pré-filtragem (filtro retangular e gaussiano). Neste contexto considerou-se as seguintes características:

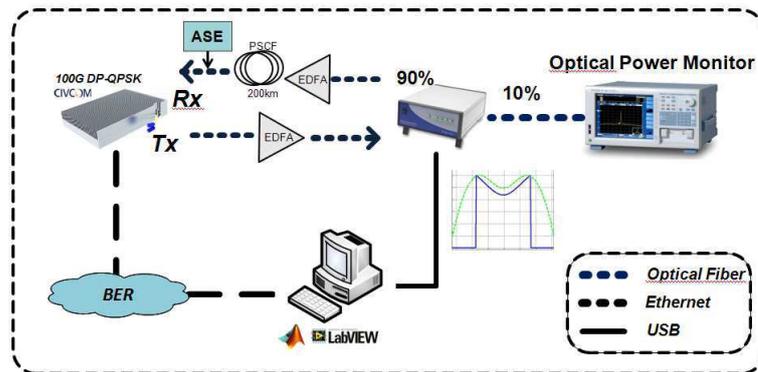


Figura 3.11: Setup experimental para caracterização do módulo e avaliação de desempenho do filtro otimizado

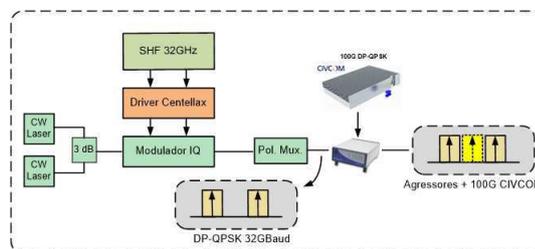


Figura 3.12: Setup experimental da geração dos canais agressores e filtragem

- Dupla polarização- QPSK;
- Potência no laser da transmissão: 4.8 dBm;
- Potência de lançamento: 12 dBm;
- Taxa de símbolo: 31.7891 Gbaud;
- Distância: 200 km de fibra SSMF (*Standard Single Mode Fiber*);
- Frequência da portadora: 193,35 THz.

A caracterização foi realizada levando em consideração dois cenários. Primeiramente para a transmissão sem fibra (*back-to-back* -B2B) seguida da utilização do método de Fourier com degrau repartido acoplado (*Coupled Split Step Fourier*-CSSF). A OSNR (*Optical Signal to Noise Relation*) foi variada por meio da inserção de ruído de emissão espontânea no pré-amplificador (Buster).

Para o segundo caso, modificou-se o sistema pela adição de dois canais adjacentes (figura 3.12), espaçados do primeiro de 50GHz, assim como pela inclusão de um filtro retangular (Banda 50 GHz e Ordem 12) ou gaussiano conforme evidenciado pelos espectros das figuras 3.13 e 3.14. Na análise comparativa para os três esquemas em teste (canal único, pré filtragem gaussiana ou retangular) verificou-se um comportamento aproximado para ambos os casos. Para uma faixa na região de SNR com 14 dB, a aplicação do filtro gaussiano proporciona uma estreita (quase indistinta) melhora de desempenho em comparação ao filtro retangular (figuras 3.16 e 3.17). Além disso, verificou-se que para o espaçamento de 50 GHz os canais adjacentes não geraram queda de desempenho no canal central, considerando os resultados simulados.

O argumento de que a aplicação do filtro de pré-ênfase repercuti sobre o desempenho da transmissão foi validado em laboratório, utilizando um filtro óptico reconfigurável com parâmetros otimizados por meio de uma algoritmo genético. Levando em consideração o primeiro cenário de teste (monocanal), conseguiu-se uma diminuição dos valores de BER em termos de ordem um. Esses resultados foram reportados como demonstrações em campo para o Funttel (Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações).

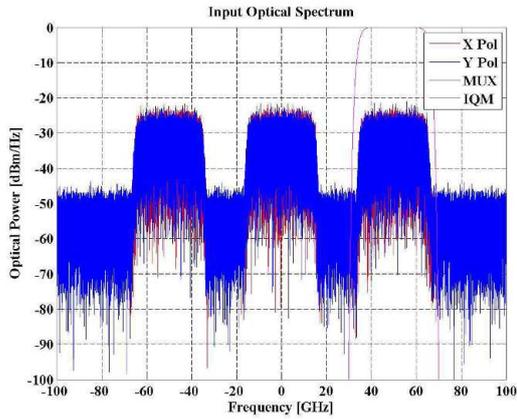


Figura 3.13: Espectro de entrada com utilização de filtro retangular

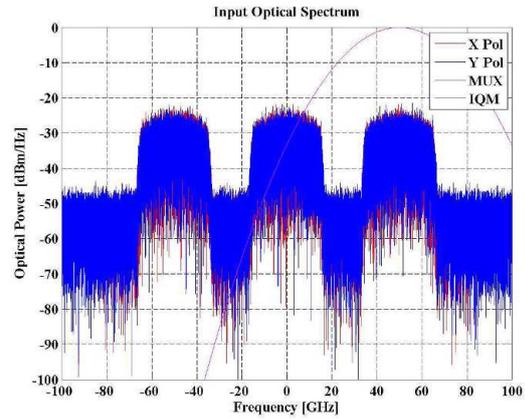


Figura 3.14: Espectro de entrada com utilização de filtro gaussiano

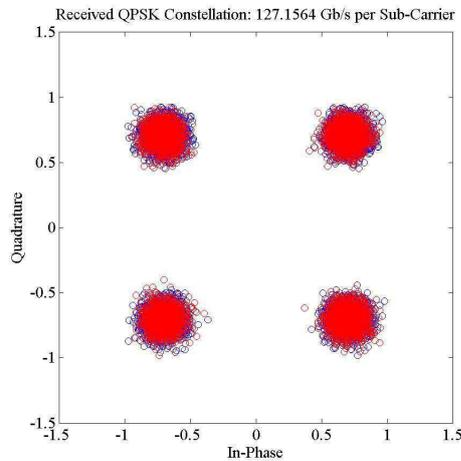


Figura 3.15: Constelação para utilização de filtro retangular

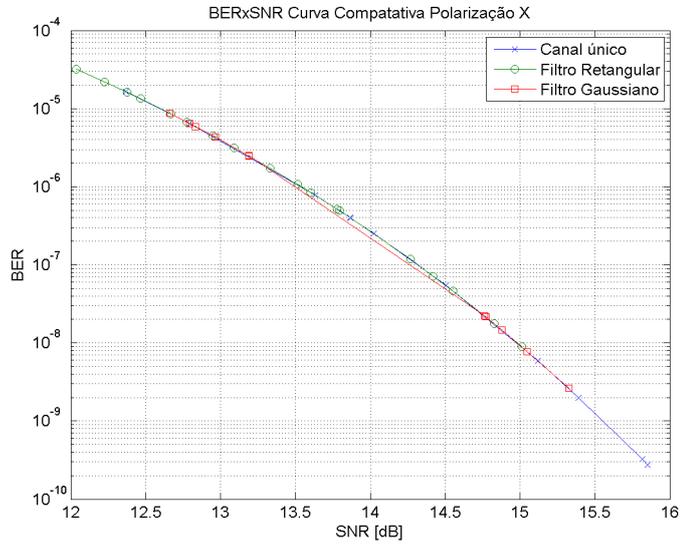


Figura 3.16: Caracterização para utilização de filtro retangular, gaussiano e canal único Polarização X

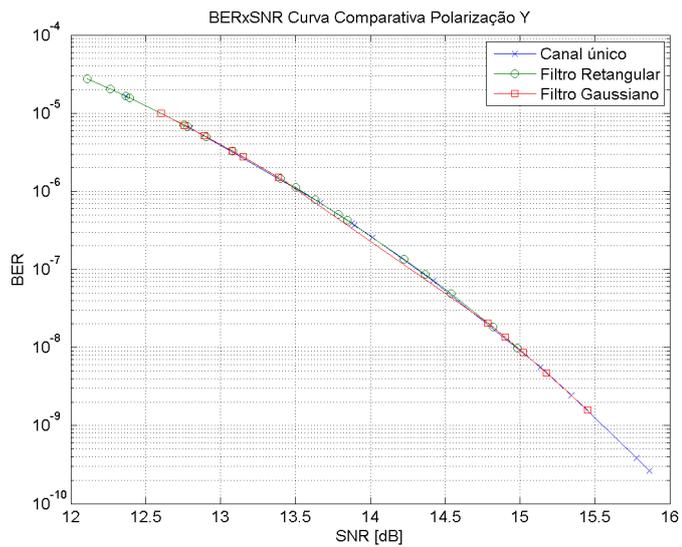


Figura 3.17: Caracterização para utilização de filtro retangular, gaussiano e canal único Polarização Y

## Capítulo 4

# Conclusões

Colocando em perspectiva os objetivos traçados no início deste trabalho e os resultados obtidos durante a realização do estágio, conclui-se que as metas foram alcançadas com êxito. O desenvolvimento das atividades em ambiente empresarial e laboratorial proporcionaram amadurecimento profissional na área de execução desse trabalho, além de fortalecimento e consolidação dos conhecimentos adquiridos ao longo da graduação. Destaca-se o convívio com especialistas em diversos segmentos das comunicações ópticas, experiências que se mostraram fundamentais para esse crescimento profissional e pessoal.

Ressalta-se que parte das atividades desenvolvidas durante este período serviram de base na elaboração do trabalho de conclusão de curso (TCC) do referido estagiário, cujos resultados foram validados utilizando a estrutura laboratorial da empresa e se encontram em um documento à parte.

# 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  $\lambda$ - 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.