

## Introdução

O desenvolvimento dos sistemas de comunicações ópticas ocorreu de forma distinta dos demais sistemas de telecomunicações. As limitações de banda e potência, em sistemas com e sem fio, impulsionaram o desenvolvimento de uma gama de ferramentas de processamento digital de sinais, novos formatos de modulação e codificação. O desenvolvimento da tecnologia de sistemas com multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) permitiu explorar a extensa banda de operação das fibras ópticas. Ao mesmo tempo, os amplificadores ópticos aliados à baixa atenuação das fibras ópticas, viabilizaram enlaces de longas distâncias sem necessidade de regeneradores elétricos.

O aumento do número de usuários, a oferta de novos serviços e demanda por conexões de banda larga alavancaram o aumento do tráfego. Todavia, sistemas que operam com taxas elevadas à longas distâncias têm seu desempenho severamente degradado por efeitos que incluem as características da própria fibra óptica e dos demais componentes presentes em um sistema como ganhos dependentes da polarização e emissão espontânea amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*). Entre os problemas estão a dispersão cromática, não-linearidades, perdas dependentes da polarização e dispersão dos modos de polarização (PMD - *Polarization Mode Dispersion*) [4].

A PMD em fibras ópticas tornou-se um dos grandes obstáculos para a implantação e bom funcionamento dos sistemas de comunicação óptica com altas taxas de transmissão. E por isso se tornou um efeito de extrema importância e determinante no dimensionamento de enlaces ópticos. A PMD trata-se de um parâmetro que depende de muitas variáveis extrínsecas à própria fibra que não são facilmente controláveis, ou mesmo quantificáveis. Este fenômeno, a PMD, ocorre devido à presença de birrefringência que muda aleatoriamente ao longo do comprimento da fibra.

O elevado custo para a ampliação da infraestrutura de redes de fibras ópticas incentiva a busca por formas mais eficientes do uso da banda passante das fibras

atualmente disponíveis. Para atingir este objetivo, existem principalmente dois caminhos: o aumento do número de portadoras transmitidas por fibra, canais com a redução do espaçamento entre portadoras, e o aumento da taxa de transmissão por canal.

A utilização conjunta da redução do espaçamento entre portadoras e o aumento de taxa de transmissão por canal resulta na necessidade de formatos de modulação mais robustos às degradações provenientes das fibras ópticas, e com maior eficiência espectral. Diversas técnicas vêm sendo discutidas, entre elas: formatos multiníveis e pseudo-ternários (DQPSK, Duobinário, entre outros); supressão total, SSB (*Single Side Band*), ou parcial, VSB (*Vestigial Side Band*), de uma das bandas laterais do espectro; OFDM (*Optical Orthogonal Frequency Division Multiplex*) e a multiplexação em polarização (PolMux - *Polarization Multiplexing*), que permite dobrar a eficiência espectral.

O objetivo deste trabalho é o estudo e a realização de experimentos para a investigação do impacto do espaçamento espectral utilizado entre canais e do impacto dos efeitos da PMD em um enlace de fibra óptica monomodo. A informação obtida através deste estudo permitirá um melhor dimensionamento e otimização de controladores de polarização em futuros sistemas de transmissão que venham a utilizar multiplexação em polarização combinado a técnicas de UDWDM (*Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing*), por exemplo.

A fim de prever o impacto do desalinhamento entre canais, se faz necessário comparar e correlacionar o comportamento dos diferentes canais. Tendo isto em vista, também foram feitas neste trabalho distribuições estatísticas da atenuação dos canais e também a obtenção da correlação, a fim de analisarmos como os canais se relacionam.

No Capítulo 2 serão apresentadas as principais características das fibras ópticas, a teoria da polarização da luz e uma rápida abordagem dos formalismos matemáticos para as representações por vetores de Jones, os parâmetros de Stokes e a representação na Esfera de Poincaré. Este capítulo também descreve os aspectos teóricos sobre a birrefringência e a PMD, apresenta brevemente alguns métodos utilizados para a medição da PMD, e descreve de maneira sucinta a transmissão de sinal utilizando a multiplexação de polarização (PolMux).

O capítulo 3 é dedicado à descrição da montagem experimental que baseou-se na medição do comportamento da polarização, por meio de um polarímetro, em função da PMD e do comprimento de onda.

O capítulo 4 apresenta os resultados experimentais que foram baseados em análises do desvio angular da polarização devido à descorrelação entre canais considerando o espaçamento espectral aplicado e a PMD presente nas bobinas de fibras ópticas utilizadas. Por fim, a conclusão deste trabalho se dá no Capítulo 5.

## 1.1

### Revisão Bibliográfica

A realização de experimentos que permitam medir a evolução da polarização em função do comprimento de onda e dos efeitos da PMD em um enlace de fibra óptica monomodo, é foco principal deste trabalho. Assim sendo, a revisão bibliográfica se propõe apresentar os alguns aspectos da PMD e a necessidade do controle da polarização.

Desde a introdução dos primeiros conceitos [5,6], e a necessidade da elevação das taxas de transmissão de sistemas de comunicações ópticos, os fundamentos da PMD tornaram-se um fator relevante e o controle de polarização no processo de compensação de PMD, uma questão importante.

Os métodos de compensação e monitoramento de PMD são diferenciados e utilizam conceitos de correlação entre canais para compensação com ou sem demultiplexação do sinal [14], [8] e [21].

A necessidade por uma maior capacidade dos sistemas de transmissão ópticos tem levado a realização de pesquisas sobre o aumento da eficiência espectral das fibras baseado em técnicas como *Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing* (UDWDM). Várias abordagens podem satisfazer esta finalidade, incluindo a redução do espaçamento entre os comprimentos de onda de canais adjacentes, o aumento da taxa de bits de cada canal e a multiplexação de polarização (PolMux), uma técnica considerada promissora. Nesta técnica, dois sinais polarizados ortogonalmente em um mesmo comprimento de onda são transmitidos simultaneamente em uma única fibra.

Apesar dos atrativos do PolMux, a sua implementação enfrenta desafios significativos. Uma dessas questões é a demultiplexação da polarização para

detectar os dois canais polarizados ortogonalmente no mesmo comprimento de onda. Como a propagação do sinal óptico está sujeita às mudanças aleatórias dos estados de polarização, devido à perturbações externas e internas, a estabilização dos mesmos se faz necessário antes da demultiplexação da polarização. Deste modo, muitos esquemas têm sido propostos para o controle de polarização [15]-[17] e [44]-[46], pois, além de ser essencial para a demultiplexação da polarização, também auxilia na compensação de PMD.

A ideia fundamental é que através do controle de polarização, o estado de polarização de saída mantenha-se estável mesmo com as diversas variações ocorridas na fibra ao longo do tempo. Dentre os diversos esquemas de controle de polarização encontrados na literatura, alguns são mencionados adiante.

- 1) A utilização do próprio canal de transmissão para realizar o controle. Isto é, o SOP de saída é idêntico ao SOP de entrada, não há variações de ângulo. Apesar de ideal, a precisão deste modelo de controle estará sujeita a dificuldades de ordem prática. Uma solução é utilizar outros canais que não o de transmissão para auxiliar no processo de controle.
- 2) A utilização de um dos canais adjacentes ao canal a ser controlado. Neste caso haverá variações do SOP de saída e também variações de ângulo. O que limitará este controle, dentre outros fatores, será o valor de PMD bem com o espaçamento espectral existente entre os canais.
- 3) A utilização da média dos sinais dos dois canais adjacentes ao canal a ser controlado. Assim como o esquema anterior, a PMD e o espaçamento espectral também influenciam na precisão deste controle.

Um elevado valor de PMD, acima de 0,5 ps [45], associado a um pequeno espaçamento espectral existente entre os canais, já é dito suficiente para decorrelacionar os canais. Caso esta decorrelação aconteça completamente, não haverá como realizar o controle de polarização. O controle preciso da polarização é necessário para obter um ótimo desempenho do sistema óptico e de seus componentes.

Deste modo, o estudo da influência dos efeitos negativos da PMD e do espaçamento espectral entre canais tornam-se essenciais para analisar o comportamento da polarização e, assim, auxiliar na escolha de bons métodos para o controle de polarização.

## **1.2**

### **Motivação**

Em virtude dos fatos apresentados, a motivação para o desenvolvimento deste trabalho está na necessidade de comprovar experimentalmente que para um valor de PMD não elevado, vinculado a um espaçamento espectral entre os canais também pequeno, um controle de polarização de boa qualidade, quando implementado, poderá ser alcançado. Para isso serão apresentadas análises, feitas para diferentes valores de PMD e de espaçamento espectral, de duas opções possíveis de serem empregadas no controle de polarização de um sinal óptico.