

## 2 Teoria

A PMD é um fator limitante em sistemas de comunicações ópticas e se trata de distorção na propagação de pulsos ópticos, devido a birrefringências aleatórias existentes no sistema óptico.

### 2.1 Teoria de PMD

A PMD é um fenômeno dispersivo aleatório que varia com o tempo e o comprimento de onda. É causada devido à assimetria geométrica e estresse existentes nas fibras ópticas. O primeiro fator pode ser reduzido durante o processo de fabricação, mas as tensões externas dependem das condições ambientais, sendo então, a PMD, considerada um processo aleatório e intrínseco dos sistemas de transmissão.

A assimetria e o estresse afetam o índice de refração da fibra, propriedade chamada *birrefringência*. Diante deste fenômeno, a energia contida num determinado comprimento de onda é dividida em dois modos de polarização ortogonal com velocidades de propagação ligeiramente diferentes, conforme mostrado na Figura 2.1. A diferença de tempo de propagação entre os dois modos de polarização ortogonais é chamada de atraso diferencial de grupo (DGD). O DGD é variável ao longo do tempo [16] e causa distorção do pulso transmitido e penalidades ao sistema.

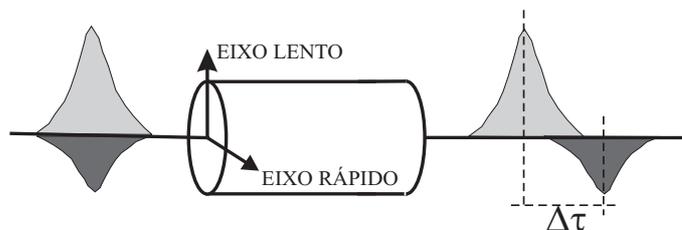


Figura 2.1: Propagação de um pulso óptico ao longo de uma fibra HiBi.

A PMD é o valor médio do DGD e representa uma grave limitação no desenvolvimento dos sistemas ópticos, pois torna inviável a transmissão de informação a altas taxas e em enlaces longos, quando a fibra óptica apresenta birrefringência residual alta.

Para a caracterização da PMD em fibras normais, são utilizados dois estados de polarização, chamados de estados principais de polarização (*Principal States of Polarization* - PSP) [14]. Esses dois estados, ortogonais entre si, existem em todo meio linear de transmissão sem perda dependente da polarização, e estão associados a dois estados de polarização de saída, também ortogonais, que não mostram dependência com a frequência óptica em 1ª ordem [7]. Assim, para cada frequência óptica  $\omega$ , existem dois estados de polarização de entrada (PSP de entrada) que não são necessariamente iguais aos PSP's de saída, mas que podem ser associados uns aos outros através da matriz de transmissão da fibra  $T(\omega)$ .

A PMD pode ser representada na esfera de Poincaré [12], que é uma ferramenta gráfica no espaço tridimensional utilizada para representar estados de polarização, através do vetor de dispersão  $\Omega$  (Figura 2.2), cujo módulo é igual ao DGD entre os PSP's na frequência  $\omega$  e cuja direção  $\Omega$  na esfera de Poincaré é, por definição, o vetor PSP mais lento. Como os PSP's são ortogonais, só é necessário representar um deles. Como na esfera, um estado de polarização qualquer é representado por um ponto, uma evolução contínua da polarização assumida pelo vetor  $\Omega$  representa um caminho contínuo na superfície da esfera.

### 2.1.1 Estatística da PMD

A PMD se diferencia de outras propriedades dos sistemas ópticos porque os efeitos danosos, causados por ela, geralmente variam estocasticamente com o tempo e o comprimento de onda. Isto significa que não é possível prever um problema para um determinado comprimento de onda, ou em um determinado tempo, mas sim trabalhar com uma descrição das probabilidades estatísticas dos eventos. Também significa que é necessário um grande conjunto de dados para se obter uma amostra significativa do comportamento da PMD, sob o risco de não conseguir uma informação precisa.

Alguns problemas que ocorrem em sistemas ópticos, como dispersão cromática e atenuação, possuem limitações específicas, permitindo que um determinado sistema seja projetado para tolerar uma situação ruim

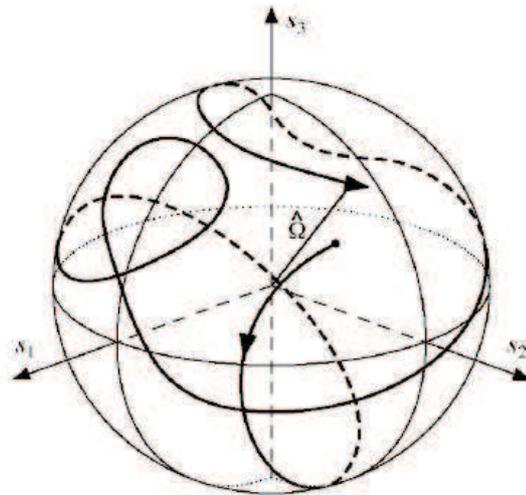


Figura 2.2: Vetor PMD representado na Esfera de Poincaré. Gráfico retirado da referência [30].

extrema. No caso da PMD, entretanto, é preciso cuidado com o conceito de tolerância a um pior caso. Um tratamento estatístico muito utilizado no entendimento da PMD é a distribuição de probabilidade. A densidade de probabilidade da PMD, em muitas situações, tem um comportamento na cauda do gráfico, que alcança valores altos de PMD e inaceitáveis para os sistemas de transmissão de sinais. Logo, nos sistemas afetados por PMD, é difícil se falar em “pior caso”, usando-se tratar de *probabilidade de falhas*.

Para compreender e prever probabilidades de falhas nos sistemas ópticos, projetar compensadores de PMD e realizar medidas precisas de PMD, é necessário compreender as estatísticas do fenômeno da PMD [45]. Dentre as possibilidades de análise estatística da PMD, duas foram exaustivamente utilizadas neste trabalho: a distribuição de probabilidade e a função de correlação.

Para gerar dados de DGD estatisticamente válidos para o conhecimento da PMD, pode-se considerar variações no tempo ou na frequência. Entretanto, o DGD geralmente apresenta variações lentas ao longo do tempo, principalmente para pequenos valores de PMD, dificultando a obtenção de uma boa estimativa. Uma alternativa é obter os dados de variação do DGD ao longo de uma faixa de comprimento de onda. Nas simulações espectrais, que serão mostradas na seção 4.1, a PMD é estimada através da média ao longo de uma faixa espectral, enquanto que as simulações temporais, utilizam a média ao longo do tempo. Obviamente foi gerado um grande

volume de dados para se obter uma estatística confiável.

De posse dos dados a serem analisados, são gerados gráficos de densidade de probabilidade. Abaixo, na Figura 2.3 é mostrado um gráfico de densidade de probabilidade, retirado de [45], para um sistema com PMD igual a 1 ps. Nesta figura são mostrados resultados de medidas e simulações. A comparação entre eles pode ser utilizada para estabelecer a veracidade dos dados e a validade do modelo de PMD utilizado.

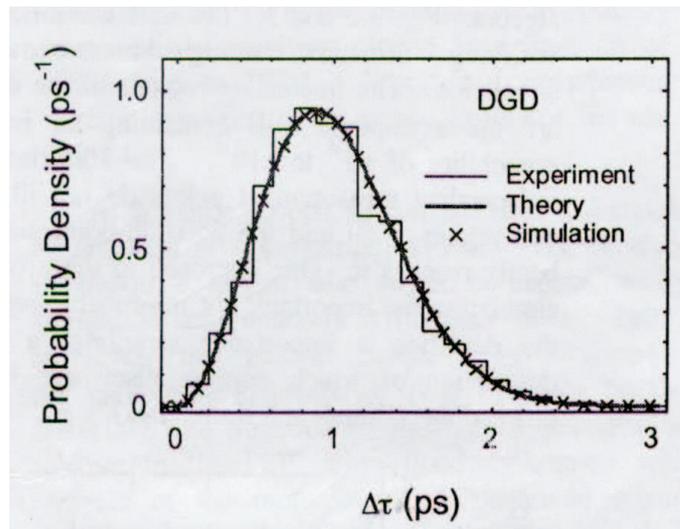


Figura 2.3: Densidade de Probabilidade Maxwelliana do DGD para uma fibra com PMD igual a 1 ps. Gráfico retirado da referência [45].

O entendimento das penalidades induzidas pela PMD, juntamente com as densidades de probabilidade de eventos, ajuda na previsão das probabilidades de falha.

A Figura 2.3 pode sofrer uma mudança para a escala logarítmica, conforme mostrado na Figura 2.4, permitindo assim uma análise mais cuidadosa dos casos de baixa probabilidade e que são relevantes na estimação das probabilidades de falhas. Para altos valores de DGD, e conseqüente baixa probabilidade, é visível que as curvas experimental e simulada não se ajustam fielmente à curva teórica. Isto é resultado do pequeno número de pontos amostrados. Uma solução para esta questão vem sendo discutida, onde as simulações procuram encontrar os pontos onde o sistema apresenta maiores valores de DGD e trabalhar em torno deste ponto, criando assim conjuntos de dados representativos para probabilidades pequenas [25].

A estimativa de probabilidade de falha de um sistema também pode ser analisada sob o aspecto da distribuição de probabilidade cumulativa. Esta função dá a probabilidade de se exceder um determinado valor, que geralmente significa o limiar para uma falha inaceitável.

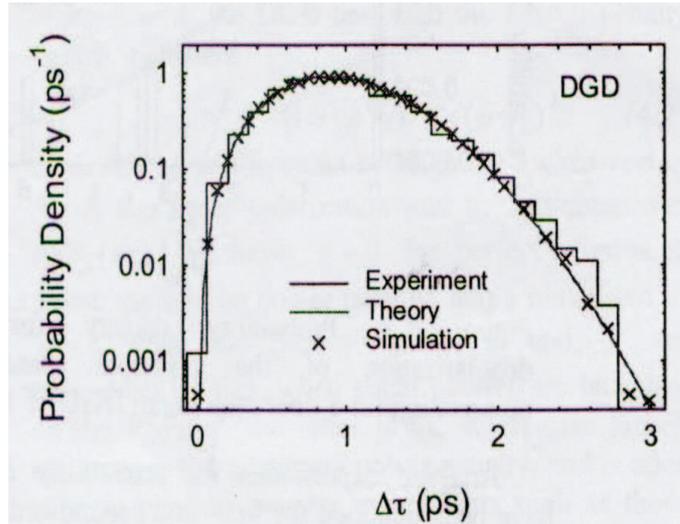


Figura 2.4: Densidade de Probabilidade Maxwelliana do DGD para uma fibra com PMD igual a 1 ps. Gráfico retirado da referência [45].

### 2.1.2

#### Penalidade de Potência devido a PMD de 1ª ordem

A PMD, em 1ª ordem, está relacionada ao atraso das duas componentes ortogonais, nas quais o sinal de entrada pode ser dividido,  $\Delta\tau$ . O desvanecimento do sinal, causado por este efeito, pode ser expressado como uma penalidade de potência, descrita como [10]:

$$penalidade(dB) = A \frac{\Delta\tau^2}{T^2} \gamma(1 - \gamma) \quad (2-1)$$

onde,  $T$  é o período da transmissão,  $0 \leq \gamma \leq 1$  é a taxa de potência relativa acoplada a cada um dos PSP's e  $\Delta\tau$  é o DGD. O parâmetro adimensional  $A$  depende da forma do pulso, do formato de modulação e de características específicas do receptor [45]. Para receptores com fotodiodo PIN, por exemplo, são reportados valores para o parâmetro  $A$  que variam de 10 a 40 para modulação NRZ (*non-return-to-zero*) e de 20 a 40 para modulação RZ (*return-to-zero*).

## 2.2

### Tecnologia de Multiplexação por Comprimento de Onda - WDM

A banda passante disponível (alta capacidade) para a fibra óptica torna esse meio de transmissão uma grande possibilidade. A transmissão simultânea de vários comprimentos de onda, numa mesma transmissão é uma alternativa para se utilizar essa capacidade existente.

A tecnologia WDM é a combinação de múltiplos sinais ópticos, com diferentes comprimentos de onda, devidamente espaçados entre si, que são inseridos e se propagam em uma mesma fibra óptica simultaneamente.

Ou seja, com a técnica WDM, é possível transmitir vários comprimentos de onda de forma simultânea, conforme mostra a Figura 2.5. Este conceito foi publicado no início dos anos 70 e, no final dessa década, já haviam testes sendo realizados em laboratório.

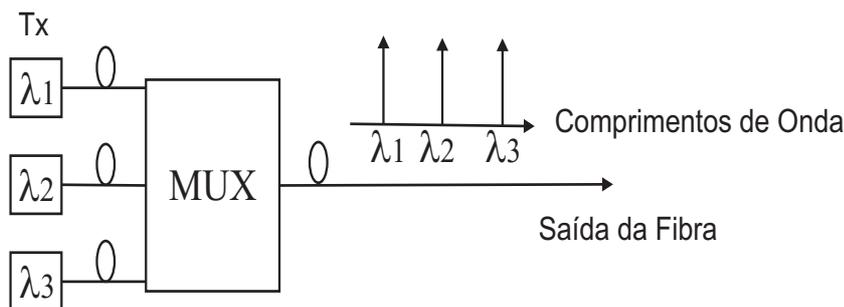


Figura 2.5: Princípio de funcionamento de um sistema WDM.

Para possibilitar a inserção destes vários sinais ópticos, é utilizado um dispositivo óptico passivo, chamado de multiplexador óptico, ou MUX. A separação dos canais é feita utilizando um demultiplexador, ou DEMUX.

Esta tecnologia vem progredindo através do aumento do número de comprimentos de onda enviados simultaneamente, acompanhado do decaimento do espaçamento entre estes comprimentos de onda. Além do aumento da densidade de canais, os sistemas aumentaram a sua flexibilidade de configuração, através de funções de inserção e retirada de canais durante a transmissão.

Os sistemas WDM são populares porque permitem que as companhias aumentem a capacidade dos sistemas sem o lançamento de mais fibras. A capacidade de um determinado enlace pode ser expandida com o simples *upgrade* dos multiplexadores e demultiplexadores em cada ponta do sistema.