

1

Teoria de PMD

O que se apresenta a seguir é uma teoria básica descrita nas referências 7 e 10, onde será apresentado um resumo dos aspectos mais importantes.

1.1. Introdução

A dispersão de modo de polarização ou PMD é uma propriedade fundamental da fibra óptica monomodo em que a energia do sinal a um dado comprimento de onda é composta por dois modos de polarização ortogonais com velocidades de propagação ligeiramente diferentes. [5]

A diferença do tempo de propagação resultante entre os dois modos de polarização é chamado atraso diferencial de grupo, ou DGD, simbolizado por $\Delta\tau$. A PMD causa sérias deteriorações na capacidade de transmissão dos sistemas [6], incluindo o espalhamento de pulso. Este efeito pode ser comparado com o da dispersão cromática, com algumas diferenças importantes. No caso da dispersão cromática, o fenômeno é relativamente estável, e pode ser calculada pela soma de suas partes, obtendo o valor total. Com isto é possível prever antecipadamente a alocação das compensações de dispersão para corrigir os efeitos deste fenômeno.

Em contrapartida, a PMD de fibras ópticas monomodo em qualquer comprimento de onda do sinal é instável, forçando os projetistas de sistemas a fazer as previsões estatísticas de PMD no sistema de transmissão digital [7]. A figura 1 nos mostra o efeito do atraso de grupo em um pulso óptico, quando este está sob influência da PMD.

A PMD pode também afetar o desempenho de sistemas com grande capacidade de canais, tipo sistemas multicanais como CATV, como mostrado na figura 2. Podemos entender a figura 2 da seguinte forma: a modulação direta na intensidade do transmissor do laser DFB (Laser semiconductor com realimentação distribuída) produz um sinal de estado de polarização fixo e gorjeio no comprimento de onda.

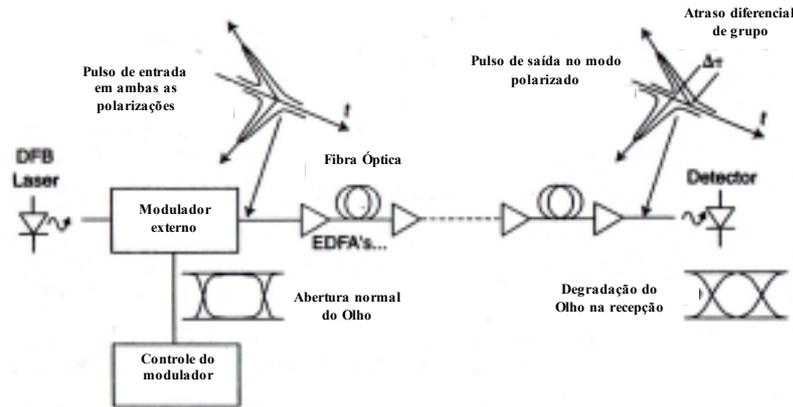


Figura 1 - Efeito da PMD em sistemas de transmissão digital.

Em outras palavras, a frequência óptica é modulada até certo ponto pela mudança na corrente do laser. Quando este sinal se propaga em uma fibra com PMD, cada componente da frequência do sinal vai ser transformada de forma diferente, adicionando uma componente de modulação da polarização ao sinal transmitido. A última contribuição negativa será feita pela perda dependente da polarização ou PDL (*Polarization Dependent Loss*) que estará associada aos componentes do sistema. Através da atenuação seletiva dos estados de polarização, a PDL discrimina a mudança de polarização em uma componente de intensidade que é detectada ao longo do sinal desejado, produzindo uma distorção de segunda ordem composta ou CSO. [6].

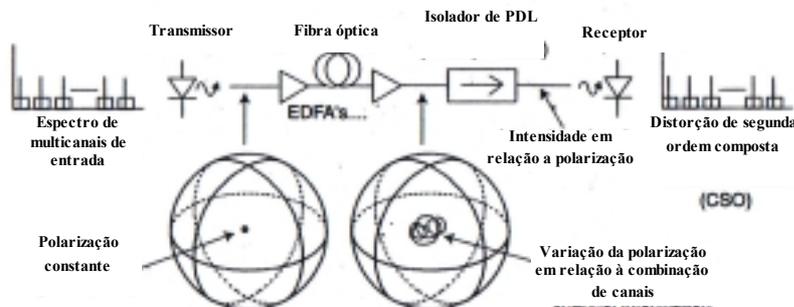


Figura 2 - Efeito da PMD em sistemas multicanais

Um projetista pode minimizar o impacto da PMD especificando baixas PMDs em fibras e componentes e minimizando a PDL (*Perda dependente da polarização*) em componentes. A PMD de fibras instaladas há muito tempo podem estar com valores muito altos, levando as operadoras de sistemas a medi-las freqüentemente para prever uma atualização de seus sistemas para taxas de transmissão mais altas.

1.2. Origens e Definições da PMD [10]

As fibras ópticas monomodo são guias de onda nos quais a luz se propaga em um único modo espacial. Devido à natureza vetorial do campo óptico, as fibras monomodo suportam, na verdade, dois modos de propagação com polarizações ortogonais com mesma distribuição espacial. Numa fibra óptica ideal, perfeitamente simétrica e sem tensões internas, os dois modos de polarização têm a mesma velocidade de fase e de grupo, ou seja, o índice de refração é o mesmo para as duas polarizações. Entretanto, em uma fibra óptica real a simetria nunca é perfeita, assim como sempre existem tensões residuais que atuam sobre o núcleo da fibra. Desta forma, o índice de refração passa a depender da orientação da polarização da luz em relação aos eixos principais da fibra de modo que esta passa a apresentar birrefringência. Cada modo de polarização tem uma velocidade de grupo diferente dando origem à distorção de sinal conhecida como dispersão de polarização.

A dispersão de polarização em fibras ópticas ocorre devido a existência de birrefringências residuais oriundas do processo de fabricação e/ou de birrefringências provocadas por tensões externas assimétricas na fibra. As birrefringências residuais têm sido bastante reduzidas com os processos de fabricação controlados. No que se refere às tensões externas pode-se dizer que o desempenho da fibra será dependente das condições ambientais, sendo que as variações da birrefringência da fibra serão aleatórias.

Para entender como se dá a distorção do sinal, considerar-se-á inicialmente uma fibra óptica com os eixos perfeitamente definidos e constantes ao longo da fibra. As fibras ópticas com alta birrefringência, também chamadas fibras HiBi, possuem dois eixos de polarização bem definidos e ortogonais entre si. Estes eixos são criados introduzindo tensões internas no processo de fabricação. Estas fibras mantêm a polarização da luz quando uma polarização linear x ou y é lançada e para outras polarizações de entrada, o estado de polarização se altera na fibra, retornando periodicamente ao estado inicial.

Os eixos de birrefringência definem dois auto-estados de polarização da matriz de Jones da fibra, que são fixos ao longo de toda a fibra HiBi e independentes da frequência óptica. Estes auto-estados propagam-se com

velocidades de grupo diferentes, sendo que a diferença entre os tempos de propagação em cada um dos auto-estados é chamada de atraso diferencial ou DGD (*Differential Group Delay*), o que também é independente da frequência óptica em primeira ordem no caso de fibras HiBi. A diferença de velocidades de propagação faz com que os auto-estados sejam descritos como tendo um modo rápido e um modo lento. Se o estado de polarização na entrada da fibra não estiver alinhado com um dos auto-estados, a luz será proporcionalmente acoplada em cada um destes e propagar-se-á alternando o seu estado de polarização, retornando periodicamente ao estado inicial. A figura 3 mostra o caso em que a luz é lançada a 45° em uma fibra HiBi.

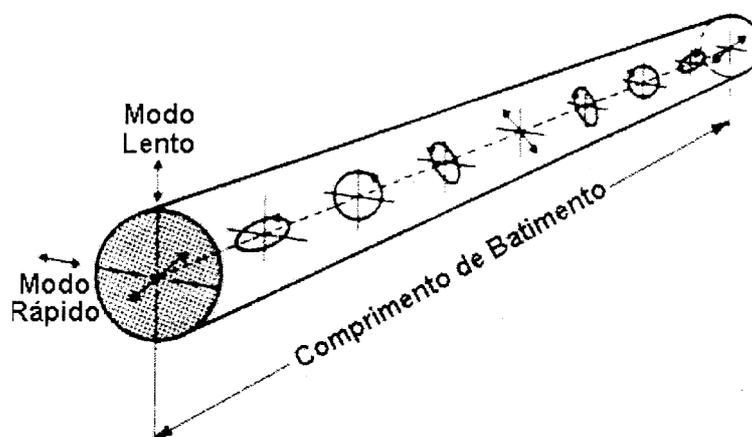


Figura 3 - Polarização da luz em fibras HiBi, com lançamento a 45° com os eixos principais.

O período de variação do estado de polarização L_b é chamado comprimento de batimento da fibra, e varia em torno de 1 mm dependendo do tipo de fibra HiBi em questão. Se a largura espectral da luz for extremamente estreita (onda monocromática), após o percurso de um longo trecho de fibra o estado de polarização será elíptico de um modo geral. Entretanto, se a largura espectral for finita e o sinal modulado, o atraso de grupo entre os dois modos de polarização cresce, e eventualmente torna-se maior do que o tempo de coerência da fonte. O resultado é que a luz fica despolarizada, já que as duas componentes ortogonais de polarização deixam de ter coerência de fase. Neste caso, podemos descrever o sinal como a soma de duas ondas independentes que se propagam com velocidades de grupo diferentes. O resultado é que temos dois sinais na saída da

fibra, atrasados pela diferença de velocidades de grupo, conforme ilustra a figura 4.

No caso de fibras HiBi, a diferença de atraso de grupo entre os dois modos de polarização é da ordem de 1 ps/m. Para um laser DFB (modulado) com largura espectral de $\Delta\lambda=0,1\text{nm}$ ou seja, $\Delta\nu\sim 12\text{GHz}$, o tempo de coerência será dado por $\tau=1/\pi\Delta\nu \sim 26$ ps de modo que após apenas algumas dezenas de metros de percurso são suficientes para despolarizar a luz e atingir a situação descrita na figura 4.

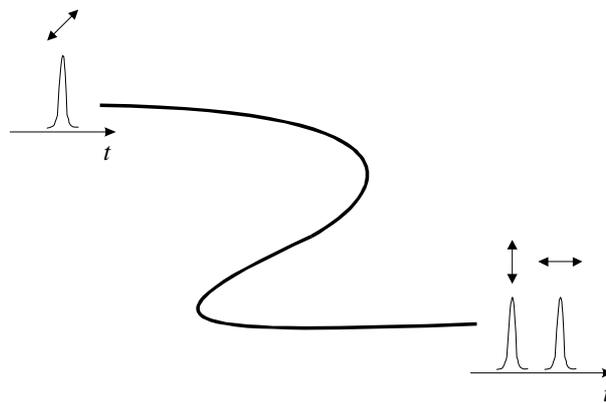


Figura 4 - Representação esquemática da propagação de um pulso ao longo de uma fibra HiBi.

Neste caso, como não há acoplamento entre os modos ou seja a luz que se propaga num dos modos não excita o outro modo, que lhe é ortogonal. O atraso entre os dois modos, que é a dispersão de polarização, será proporcional ao comprimento da fibra HiBi.

Numa fibra monomodo real, se a luz tiver uma largura espectral não muito grande, existem sempre dois estados principais de polarização, (PSP) que são invariáveis a uma variação da frequência. Estes estados correspondem ao maior e ao menor tempo de propagação do sinal ao longo da fibra [12] e são usados para a descrição da distorção do sinal.

Dado que a birrefringência residual depende das condições externas, cada trecho da fibra se altera com o tempo, assim como a matriz global da fibra. Deste modo, tanto a polarização dos estados principais como o atraso entre eles será variável no tempo.

Por outro lado, os PSP dependem do comprimento de onda, de modo que a situação acima só é válida se a largura espectral da fonte for pequena comparada

com a variação dos PSP com a frequência óptica.

Representando-se os PSP por um vetor Ω na esfera de Poincaré, basta representar um dos estados pois o outro é ortogonal, e portanto corresponde ao vetor diametralmente oposto.

Deste modo a evolução dos PSP correspondentes pode ser observada de forma ilustrativa na figura 5.

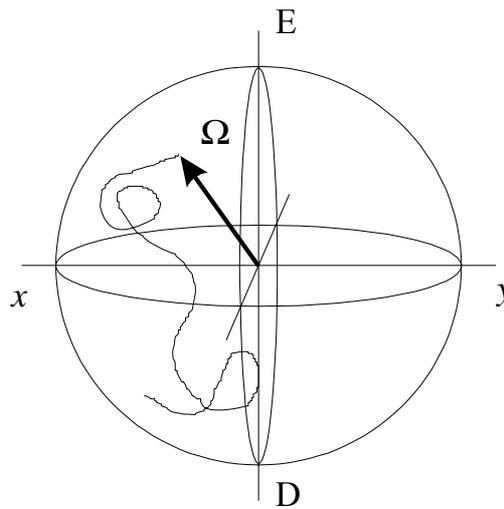


Figura 5 - Evolução temporal dos estados principais de polarização

A variação temporal do atraso diferencial de grupo (DGD) entre os PSP é aleatória, de modo que o DGD varia permanentemente ao longo do tempo, de acordo com a representação mostrada na figura 6.

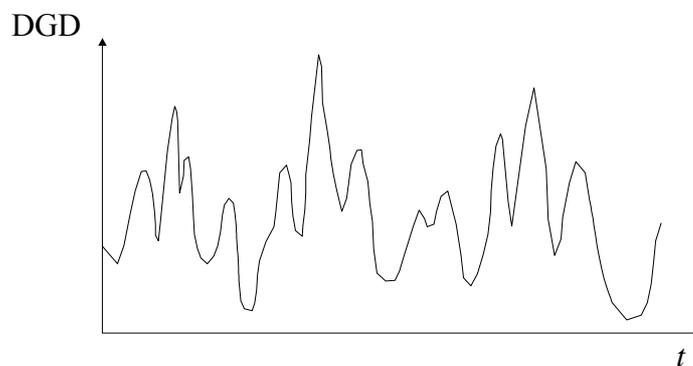


Figura 6 - Esquemático da evolução temporal do DGD entre os dois estados de polarização.

1.3. Efeitos da PMD

As fibras ópticas e componentes geralmente apresentam uma pequena diferença de índices e refração para determinado par de estados de polarização ortogonais, o que define a chamada birrefringência. Esta diferença de índice provoca diferentes tempos de propagação, conhecidos como atraso diferencial de grupo, como já mencionado, para ondas viajando nestes modos de polarização, como mostrado na figura 7.

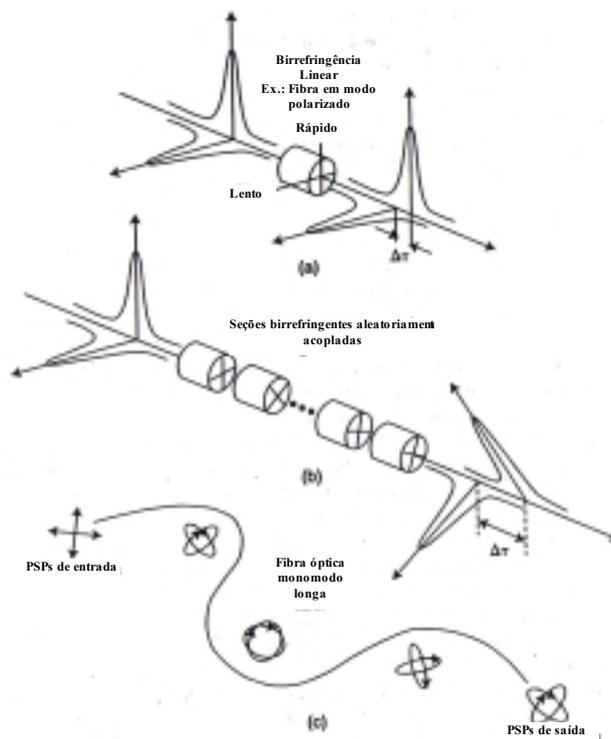


Figura 7 - Modelo conceitual de PMD. (a) birrefringência simples. (b) birrefringências concatenadas aleatórias. (c) entrada e saída dos estados principais de polarização.

Em fibras monomodo, as birrefringências originam-se devido a não-circularidade ou ovalização do núcleo da fibra mediante dois caminhos: um guia de onda ovalizado é inerentemente birrefringente, e os esforços mecânicos imputados em campo pelo núcleo oval induzem uma birrefringência adicional. Este efeito provocado pelo guia de onda geralmente acontece em fibras com baixo PMD. O acoplamento de modos, que será descrito no item a seguir, faz com que o DGD seja dependente do comprimento de onda e das condições ambientais.

A birrefringência dos cristais como o quartzo, é produzida pela própria

estrutura do cristal. A PMD em componentes ópticos pode ser causada pela birrefringência dos compostos deste componente, incluindo aí o quartzo, ou segmentos de fibra assimétricos.

A propagação do sinal ao longo de caminhos paralelos, de comprimentos ópticos levemente diferentes, onde a divisão é em função da polarização, também produz DGD. A PMD de certos tipos de isoladores ópticos é provocada por este mecanismo de caminhos paralelos. Normalmente os componentes em estado da arte têm o DGD especificado na ordem de 0,05 ps.

As fibras HiBi (alta birrefringência) são exemplos de birrefringência por estresse induzido. Elementos diferentes do vidro inseridos à casca asseguram que o núcleo está exposto a um campo assimétrico de esforços internos constantes ao longo da fibra. Ou seja, quando a luz é lançada com polarização linear ao longo de um dos eixos principais, a polarização é mantida. Estas fibras são conhecidas como fibras que mantêm a polarização (*Polarization Maintaining Fibers – PMF*), com isto então evitando o acoplamento de energia entre os modos.

O grau de birrefringência de uma PMF é sempre expressa em termos de comprimento de batimento, que para estas fibras é de poucos milímetros. O comprimento de batimento é definido como o comprimento em que as ondas rápidas e lentas mudam suas fases relativas em 360°.

Birrefringências induzidas por curvatura não são propriamente causas de PMD, embora a modificação do acoplamento de modos ao longo da fibra pode causar uma diferença na medida de PMD entre a fibra óptica bobinada, cabeada e instalada.

1.4. Acoplamento de Modos e Estados Principais de Polarização

A birrefringência de uma fibra monomodo varia ao longo de seu comprimento, a partir dos processos de extrusão e de cabeação da fibra. Um modelo estatístico detalhado foi desenvolvido a partir de bases de birrefringências locais acumuladas, e tem sido experimentalmente confirmada.[11-13].

Uma fibra de comprimento longo, como foi mostrada na figura 7, é entendida como uma série de pequenos segmentos de comprimentos aleatórios, segmentos birrefringentes de rotação aleatória. Cada segmento exhibe modos de

polarização lenta e rápida, geralmente com algum sinal de luz propagando em cada um deles. O campo elétrico emergente de cada segmento é projetado sobre o modo de polarização do segmento seguinte, definindo então o acoplamento de modos.

Este processo é repetido diversas vezes ao longo do enlace de fibras, e é este o mecanismo que causa o atraso diferencial de grupo (DGD) na maioria dos sistemas de fibras já instaladas, mostrando uma dependência ao comprimento de onda e às condições ambientais. Então em fibras que apresentam acoplamento de modos aleatório, o crescimento da PMD se dará em função da raiz quadrada do comprimento. [14]

A propagação mais rápida e mais lenta através do enlace de fibras pode estar relacionada à entrada ortogonal dos estados de polarização particulares ao enlace de fibra e a condições ambientais. Esta relação é mais facilmente entendida usando a esfera de Poincaré. Em geral, a polarização de saída de um componente ou fibra óptica descreverá um caminho irregular na esfera de Poincaré quando o comprimento de onda mudar.

Sobre um pequeno intervalo de comprimento de onda, qualquer fração deste caminho pode ser representado como um arco de círculo (ω_1 e ω_2). O centro do círculo projetado normal ao plano do círculo e a superfície da esfera, localiza dois estados que são diametralmente opostos e conseqüentemente ortogonais. Estes estados são chamados estados principais da polarização.

A característica dos estados principais é que sobre um intervalo estreito de comprimento de onda, eles localizam os eixos da esfera sobre os quais o estado de polarização de saída gira quando o comprimento de onda sofre uma mudança. A figura 8 mostra os dois exemplos.

Na ausência de acoplamento de modos, o caso típico para componentes ópticos, os estados principais são fixos. Quando o comprimento de onda muda ($\omega_1 \rightarrow \omega_2$), os estados de polarização de saída têm uma órbita regular ao longo dos eixos dos estados principais da esfera, conforme mostrado na figura 8a. Geralmente para comprimentos longos de enlaces de fibras ópticas, os estados principais movem-se aleatoriamente sobre a esfera em função do comprimento de onda (ω_1 e ω_2) conforme pode ser observado na figura 8.b, e podem ser considerados fixos apenas para intervalos muito estreitos de comprimentos de onda.

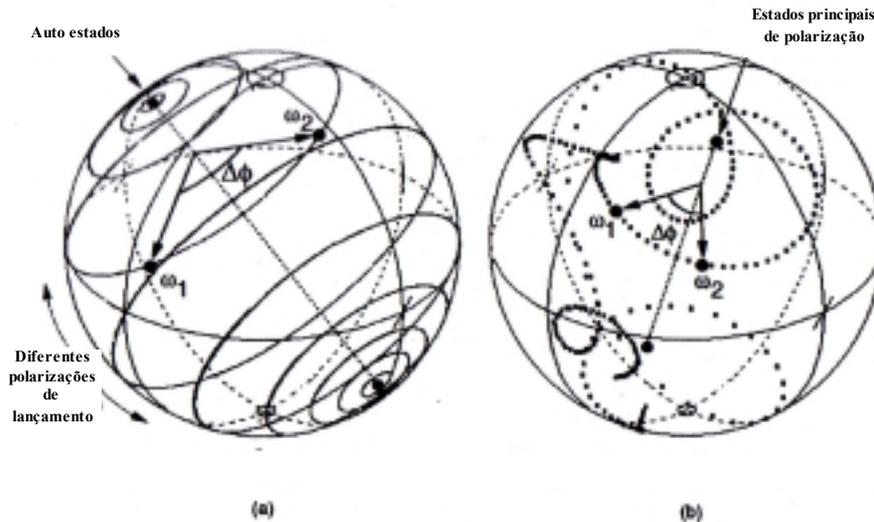


Figura 8 - Variação da polarização de saída com λ . (a) dispositivo sem acoplamento de modo. (b) fibras SM longas: acoplamento de modos aleatório.

Uma descrição mais rigorosa da PMD de uma fibra em particular a um dado tempo requer a especificação de DGD e dos estados principais como função do comprimento de onda.

Embora apenas a média ou valor rms do DGD é atualmente especificada para aplicações comerciais, o comportamento dos estados principais é de grande interesse para pesquisa e fabricantes de cabos ópticos.

1.5. Caracterização Estatística

Quando se analisa um projeto de um sistema, o impacto da PMD é previsto através da distribuição do $\Delta\tau$, ou DGD, sendo este o parâmetro que define o alargamento do pulso óptico.

Em sistemas com N fontes individuais de PMD, a PMD total pode se estimada através da seguinte equação:

$$PMD = \sqrt{\langle \Delta\tau_1 \rangle^2 + \langle \Delta\tau_2 \rangle^2 + \dots + \langle \Delta\tau_N \rangle^2} \quad (1)$$

onde $\langle \Delta\tau \rangle$ é a média do DGD em um determinado comprimento de onda, chamado também de valor esperado.

A representação que melhor reflete a PMD, definido em um espaço real

tridimensional como a esfera de Poincaré, é o vetor de dispersão de polarização Ω , ilustrado na figura 9. Este vetor se origina no centro da esfera de Poincaré e aponta em direção aos estados principais de polarização sobre os quais o estado de polarização de saída gira no sentido horário de acordo com o incremento da frequência óptica ω .

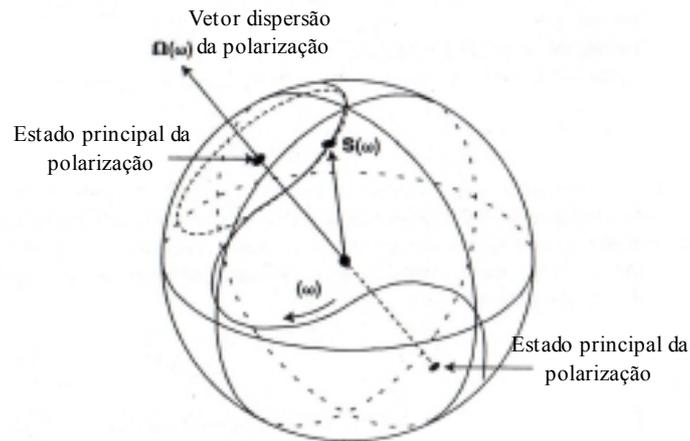


Figura 9 - Representação do vetor de dispersão da PMD.

O comprimento de Ω , ou $|\Omega|$, é o atraso diferencial de grupo. Quando o estado de polarização de saída é expresso como um vetor tridimensional s composto de parâmetros normalizados de Stokes localizando o estado de polarização na esfera, a rotação sobre o eixo do estado principal de polarização pode ser escrita como um produto cruzado:

$$\frac{\vec{ds}}{d\omega} = \vec{\Omega} \times \vec{s} \quad (2)$$

A taxa de rotação do estado de polarização de saída sobre o eixo dos estados principais é uma medida do atraso diferencial de grupo de componentes, independente do grau de acoplamento. Entretanto, em dispositivos com alto acoplamento de modos a relação deve ser avaliada sobre pequenos incrementos de comprimentos de onda, de tal forma que os estados principais se mantenham fixos. O DGD é dado então pela equação:

$$\Delta \tau = \frac{\Delta \theta}{\Delta \omega} \quad (3)$$

onde $\Delta \tau$ é o atraso diferencial de grupo, em segundos, $\Delta \theta$ é a rotação sobre o eixo dos estados principais, em radianos, e $\Delta \omega$ é a variação da frequência óptica que produziu um arco na esfera, em radianos por segundo.

Foi demonstrado por Darcie, T.E. et al que no acoplamento de modos aleatórios ou regime em fibras longas, o DGD segue a distribuição de Maxwell [6], ou seja, a distribuição de valores medidos de DGD sobre um espectro largo de comprimento de onda será Maxwelliano. E a mesma distribuição será encontrada sobre o tempo em um comprimento de onda fixo, se o enlace óptico for influenciado pelas condições ambientais. Como resultado desta variabilidade, a PMD de um enlace óptico é expressa estatisticamente, como qualquer uma das duas características médias ou valor rms do DGD, expressa pela equação abaixo:

$$PMD = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} \langle \Delta \tau \rangle \quad (4)$$

onde $\langle \Delta \tau \rangle$ representa o valor médio de DGD sobre um comprimento de onda, em ps.

É interessante notar a relação da distribuição de Maxwell com o vetor dispersão Ω mostrado no item 1.2. A um dado comprimento de onda, a direção Ω localiza o PSP (*Estado Principal de Polarização*) na superfície da esfera de Poincaré e o seu comprimento nos dará a magnitude do DGD. O vetor de dispersão pode ser decomposto em três vetores ortogonais ao longo dos eixos da esfera. Devido a cada um destes componentes originados, as birrefringências aleatórias podem ser descritas estatisticamente pela distribuição Gaussiana, na forma de:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

A magnitude do vetor de dispersão de polarização é dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados de três variáveis aleatórias normais e independentes, com média zero, e descritas por uma distribuição Maxwelliana, dada por :

$$f(x; PMD) = \frac{32 x^2}{\pi^2 \alpha^3} e^{\frac{-4x^2}{\pi \alpha^2}} \quad (6)$$

Os formatos das distribuições Gaussianas e de Maxwell são mostrados abaixo na figura 10.

Os valores rms e médio do conjunto de dados da Maxwelliana são dados por:

Dado que :

$$\alpha = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \varepsilon \quad , e \quad (7)$$

$$rms = \sqrt{3} \varepsilon \quad , \quad (8)$$

fazendo a razão entre os termos,

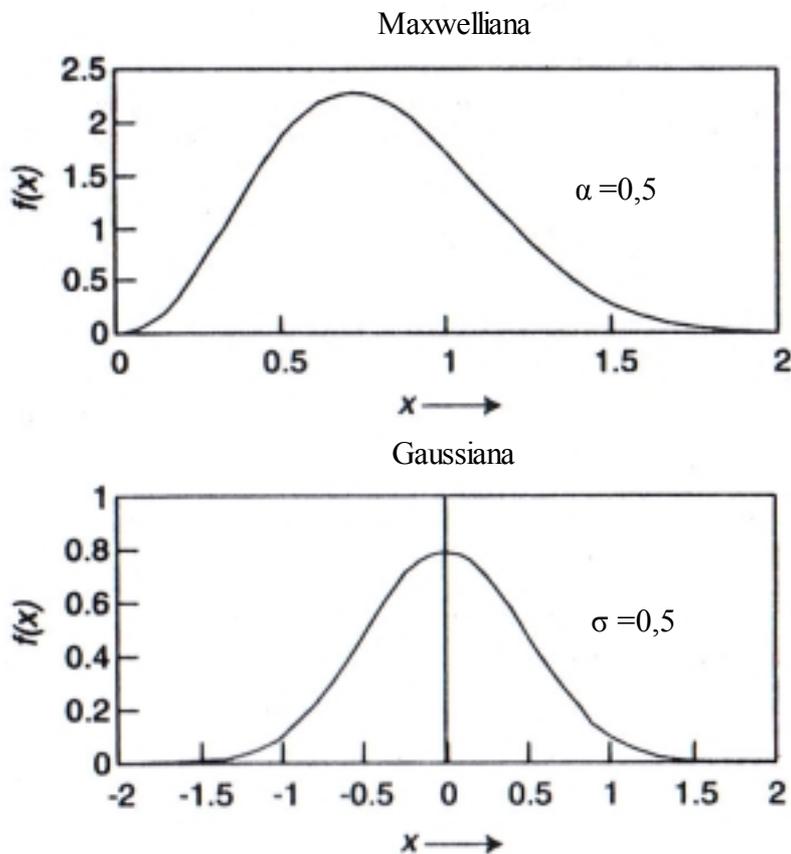


Figura 10 – Exemplo de distribuições Maxwelliana e Gaussiana.

teremos
$$\frac{\alpha}{rms} = \sqrt{\frac{8}{3\pi}} \quad (9)$$

isolamos o valor rms,

$$rms = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} \alpha \quad (10)$$

onde o valor médio será: α (11)