

## 3 Simulador Temporal

Este capítulo descreve a ferramenta computacional desenvolvida para utilização no estudo da PMD, sendo aqui apresentada a modelagem do simulador, espectral e temporal. Também são descritas algumas aplicações onde os dados gerados pelo *software* foram utilizados.

### 3.1 Modelagem do Simulador Temporal

O fenômeno da PMD em fibras ópticas ocorre devido à birrefringência residual existente na fibra. Essa birefringência varia aleatoriamente ao longo do comprimento da fibra. As fibras são comumente modeladas como uma sequência de seções de birrefringência aleatória, cuja magnitude varia ao longo do comprimento da fibra [17].

Para realizar as simulações, neste trabalho, foi utilizado o formalismo de Jones. Através desse recurso matemático é calculada a matriz de transferência da fibra. A matriz de Jones,  $T(w)$ , que descreve a fibra na frequência óptica  $w$  é calculada por  $N$  produtos sucessivos de duas matrizes [18]:

$$T(w) = \prod_{n=1}^N B_n(w)R_n(\alpha) \quad (3-1)$$

onde  $B_n(w, t)$  representa a matriz de birrefringência do  $n$ -ésimo segmento de fibra e  $R_n(\alpha)$  é a matriz do rotator, representada pelo acoplamento aleatório em cada emenda.

Reescrevendo a equação acima, temos:

$$T(w) = \prod_{n=1}^N \begin{pmatrix} e^{j[b_nwh_n+\phi_n]/2} & 0 \\ 0 & e^{-j[b_nwh_n+\phi_n]/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_n & \sin \alpha_n \\ -\sin \alpha_n & \cos \alpha_n \end{pmatrix} \quad (3-2)$$

onde  $N$  representa o número de segmentos,  $b = \frac{\Delta n}{c}$  é a dispersão da fibra em  $ps/m$ ,  $w$  é a frequência óptica,  $h_n$  representa o comprimento de cada um dos segmentos de fibra,  $\phi_n$  é uma fase aleatória com distribuição uniforme entre 0 e  $2\pi$ , que representa uma pequena variação na temperatura ao longo da fibra e  $\alpha_n$  é o ângulo de acoplamento entre estes segmentos. O DGD, para um único comprimento de onda, pode ser calculado a partir do determinante da matriz  $[\partial T/\partial w]^{-1}$ .

Inicialmente, foram realizadas simulações prevendo o comportamento espectral da PMD e, a partir desse momento, estas simulações serão referidas como **simulação espectral**. Para isto, foram considerados os comprimentos de onda dentro da janela da banda C (1530 a 1565  $nm$ ). Dentro desta janela foi tomado um número suficiente de pontos para assegurar uma estatística segura.

O conjunto de valores de  $h_n$ , na equação 3-2, é gerado uma única vez para cada simulação. São valores aleatórios com distribuição normal com tolerância de 30% em torno do valor médio de cada pedaço. Os ângulos de acoplamento  $\alpha_n$ , assim como os tamanhos de cada pedaço, são aleatórios. Os métodos usuais de simulação, aqui chamados de **simulações espectrais**, consideram a introdução de uma fase aleatória ( $\phi_n$ ), entre cada pedaço em que é decomposta a fibra e a geração de um grande número de espectros diferentes, na tentativa de melhorar a estatística. Do ponto de vista prático, esta fase aleatória é originada por variações da temperatura da fibra, de modo que, nas nossas simulações, cada espectro foi gerado modificando-se o tamanho de cada um dos pedaços por um comprimento infinitesimal, aleatório. Para cada novo espectro gerado é escolhido um conjunto de números diferentes que representam essas variações mínimas nos comprimentos dos pedaços, resultando em conjuntos de dados que representam as possibilidades de variação da temperatura “ao longo” do tempo.

Outro problema relacionado com a estatística, nestas simulações espectrais está relacionado com a largura de banda utilizada na simulação. Dentro da validade do teorema ergódico, um espectro de DGD contém a informação da estatística e equivalerá à estatística dos DGD's no domínio do tempo, desde que a largura espectral seja suficiente para fornecer uma estatística adequada. Este é o princípio dos equipamentos comerciais de medida da PMD. No entanto, quando a PMD é baixa, sua variação espectral é pequena e um espectro contendo da ordem de 80 a 100  $nm$  é insuficiente para gerar a estatística, conforme será mostrado no capítulo seguinte, de resultados.

A inserção da aleatoriedade,  $\phi_n$ , e um grande número de espectros gerados, ajudam na obtenção de uma estatística confiável. Os dados gerados, entretanto, apesar de representarem o comportamento do DGD durante um determinado intervalo de tempo, não possuem informações de como essas variações acontecem no decorrer do tempo, ou seja, não apresentam continuidade temporal. E, esta informação de continuidade é de grande importância para um entendimento mais seguro do comportamento da PMD nas fibras. Um exemplo da necessidade de se conhecer a evolução temporal contínua da PMD é no caso da utilização de códigos corretores de erro, onde é preciso saber a duração de tempo das rajadas de erro.

Para simular a evolução temporal da fibra, o programa foi modificado. Para isto, a função aleatória, responsável por gerar as variações mínimas no comprimento de cada pedaço, foi substituída por outra que cria uma função de variação aleatória da birrefringência da fibra. Logo, a equação 3-2 agora tem também uma variável temporal além da variável de frequência,  $T(w, t)$  [47].

$$T(w, t) = \prod_{n=1}^N \begin{pmatrix} e^{j[b_n(t)wh_n]/2} & 0 \\ 0 & e^{-j[b_n(t)wh_n]/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_n & \sin \alpha_n \\ -\sin \alpha_n & \cos \alpha_n \end{pmatrix} \quad (3-3)$$

Para a equação acima, a cada passo da simulação, representando a evolução temporal, a birrefringência de cada pedaço sofre uma variação determinada, linear a cada passo, mas a uma taxa diferente entre os pedaços. Após um certo número de iterações, um novo conjunto randômico para os passos  $\delta_n$  é escolhido. A equação 3-4 mostra como esta variação foi inserida no simulador. Vale ressaltar que esse conjunto,  $\delta_n$ , possui valores positivos e negativos, de forma que a variação da birrefringência seja limitada e tenha média igual a zero, para uma sequência infinita. A partir deste momento, estas simulações serão referidas como **simulação temporal**.

$$b_n(t) = b_n(t - 1) + \delta_n \cdot t \quad (3-4)$$

Para garantir que o valor da birrefringência de cada seção não evolua indefinidamente e que se mantenha dentro de uma faixa de valores razoáveis, a inclinação da variação é invertida cada vez que o valor da birrefringência atingir um determinado limite. Como a variação da birrefringência é “dependente” das variações ambientais, essa medida de controle garante que a temperatura ambiente está dentro de valores realistas. De acordo com

um gráfico de variação da birrefringência *versus* variação da temperatura, apresentado em [6], admitiu-se que esse limite de variação da birrefringência é de 5% do valor inicial. Esse valor percentual considera que as variações ambientais a que o sistema está submetido estão dentro da faixa que vai de  $-10$  a  $+40$  graus Celsius.

Utilizando a equação 3-2 e a variação temporal introduzida pela equação 3-4, é obtida uma evolução contínua da Matriz de Jones que descreve fibra ou emulador, permitindo então, o cálculo do DGD, do PSP e do estado de polarização de saída ao longo do tempo do sinal para qualquer comprimento de onda desejado.

Para a simulação de sistemas de múltiplos canais, foi tomado o cuidado de considerar que todos os comprimentos de onda experimentem a mesma situação na fibra. Portanto, os cálculos para todos os canais foram realizados antes que o próximo “instante de tempo” fosse calculado, através do incremento de  $\delta_n$ .

Considere a seguinte matriz:

$$A = T'(w) * T^{-1}(w) \tag{3-5}$$

onde  $T'(w)$  é a derivada da matriz em função da frequência  $w$ .

O cálculo dos PSP's é realizado através dos auto-vetores da matriz  $A$ , dados por:

$$V = \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \tag{3-6}$$

Como  $T'(w) * T^{-1}(w)$  é uma matriz 2x2:

$$\nu_1 = T'_{11} * T_{12} - T'_{12} * T_{11} \tag{3-7}$$

$$\nu_2 = T'_{11} * T_{22} - T'_{12} * T_{21} - j \frac{\delta_\tau}{2} \tag{3-8}$$

onde  $\delta_\tau$  é a diferença entre os tempos de propagação de cada PSP, ou seja o DGD. Reescrevendo  $V$  em função dos ângulos que definem o estado de polarização na esfera de Poincaré:

$$V = \begin{pmatrix} \cos\chi \\ \text{sen}\chi * e^{j\Phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \tag{3-9}$$

sendo a norma de  $V$  igual a:

$$\|V\| = \sqrt{|\nu_1|^2 + |\nu_2|^2} \quad (3-10)$$

e considerando que  $\nu_1$  e  $\nu_2$  são números complexos com módulo e ângulo iguais a  $\nu_1 = r_1 * e^{jz_1}$  e  $\nu_2 = r_2 * e^{jz_2}$ , podemos escrever:

$$\begin{cases} \cos\chi = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2+r_2^2}} \\ \sen\chi = \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2+r_2^2}} \\ \Phi = z_2 - z_1 \end{cases} \quad (3-11)$$

e, por fim, encontrar os vetores de Stokes dos PSP's:

$$\begin{cases} S_1 = \cos(2 \cdot \chi) \\ S_2 = \sen(2 \cdot \chi) * \cos\Phi \\ S_3 = \pm \sen(2 \cdot \chi) * \sen\Phi \end{cases} \quad (3-12)$$

Uma vez que a Matriz de Jones e o PSP ao longo do tempo foram calculados, é feita a projeção do SOP de saída nos dois PSP's e é possível calcular a energia em cada PSP e o nível do sinal óptico recebido. O desvanecimento que o nível do sinal sofre é relacionado com uma penalidade de potência (distorção de 1ª ordem) e pode ser estimado pela equação já discutida em 2.1.2 e apresentada em [10]:

$$penalidade(dB) = A \frac{\Delta\tau^2}{T^2} \gamma(1 - \gamma) \quad (3-13)$$

onde A é um parâmetro adimensional dependente do formato do pulso óptico transmitido,  $\Delta\tau$  é o DGD,  $T = 1/B$ , sendo B a taxa de bits e  $\gamma$  é o coeficiente de acoplamento, que reflete a potência relativa acoplada a cada um dos PSP's.

## 3.2

### Aplicação do Software

A ferramenta de simulação desenvolvida, apresentada na seção acima, foi aplicada a algumas situações para o estudo do comportamento da PMD e também para a compensação desse fenômeno dispersivo. Nesta seção são citados alguns conceitos e como o *software* de simulação foi utilizado.

A primeira aplicação é na implementação de um novo modelo descritivo para o comportamento do DGD, chamado de *hinge model* (ou modelo de junção, dobradiça) onde alguns elementos do sistema de transmissão agem como rotadores de polarização, acelerando as variações que o DGD sofre.

O *software* foi aplicado no estudo de técnicas de compensação de PMD para sistemas com múltiplos comprimentos de onda. A princípio, é mostrado um método que posiciona um controlador de polarização na metade do enlace de transmissão (*Mid-span*) e que é realimentado com dados provenientes do receptor. Também é mostrada uma maneira de se compensar a PMD através de associação de uma técnica de correção de erros, mais um elemento misturador de polarização e um elemento de controle de polarização.

### 3.2.1 Hinge Model

Na modelagem usual dos sistemas ópticos que sofrem com o fenômeno da PMD, as amostragens temporais do DGD possuem a mesma distribuição maxwelliana para todas as frequências, significando que todos os canais são afetados pela PMD da mesma maneira [53]. Esta modelagem maxwelliana, é considerada clássica e se mostra excelente quando o DGD apresenta descorrelação rápida, para o domínio da frequência e do tempo [16]. Entretanto, apesar deste modelo ter sido aceito por um longo tempo, alguns trabalhos experimentais mostraram que nem sempre a estatística se apresenta exatamente dessa forma [26], [27], e mais recentemente [57]. Essa idéia, de que canais diferentes experimentam diferentes distribuições estatísticas, é a base de um modelo proposto por Brodsky *et al.* [39], [40], chamado de *hinge model*. Neste modelo, cabos subterrâneos são considerados como “congelados” para as variações rápidas, seguindo as variações sazonais lentas do ambiente. Por outro lado, pequenas distâncias de fibra, que se encontram expostas ao meio ambiente, ou elementos do sistema de transmissão localizados ao longo do enlace, como pontes, módulos de compensação e amplificação, salas de controle, agem como rotatores aleatórios de polarização conduzidos pelas variações de temperatura e vibrações mecânicas [34]. Estes rotatores aleatórios, chamados de *hinges*, são os responsáveis pelas variações temporais da PMD na escala de tempo rápida.

Num trabalho publicado recentemente [57], foram realizadas medidas em cabos ópticos enterrados, na cidade de Torino, na Itália, por 73 dias, para um sistema de múltiplos canais em uma faixa de 90 *nm*. O DGD medido se mostrou bastante estável ao longo do tempo e para esse conjunto de dados obtidos a modelagem clássica maxwelliana parece ser inadequada, fazendo os autores suporem que o melhor ajuste seria pelo *hinge model*.

As simulações computacionais de *hinge model*, neste trabalho, foram

realizadas conectando-se em série, “fibras congeladas” (com variação muito lenta do DGD) com controladores de polarização ou fibras de menor valor de PMD. Nessas fibras de menor PMD, assim também como nos controladores de polarização, a variação do DGD acontece de forma mais veloz que nas “fibras congeladas”, simulando assim, o efeito dos *hinges*.

### 3.2.2 Compensação de PMD

A PMD é um obstáculo em muitos dos sistemas de transmissão por fibras ópticas, à medida que a taxa de transmissão de *bits* aumenta. Consequentemente, existe um grande interesse em técnicas que compensem ou diminuam os efeitos da PMD, e algumas soluções, elétricas e ópticas, foram propostas para essa finalidade. O problema principal é a grande influência da variação temporal na PMD [23], característica essa que força as técnicas de compensação a terem uma adaptação dinâmica das mudanças durante o funcionamento do sistema.

A função do compensador de PMD é realinhar e restaurar o *bit* óptico antes do sinal ser decodificado, conforme mostrado na Figura 3.1. O *software* de controle é um algoritmo inteligente realimentado pelo sinal de saída.

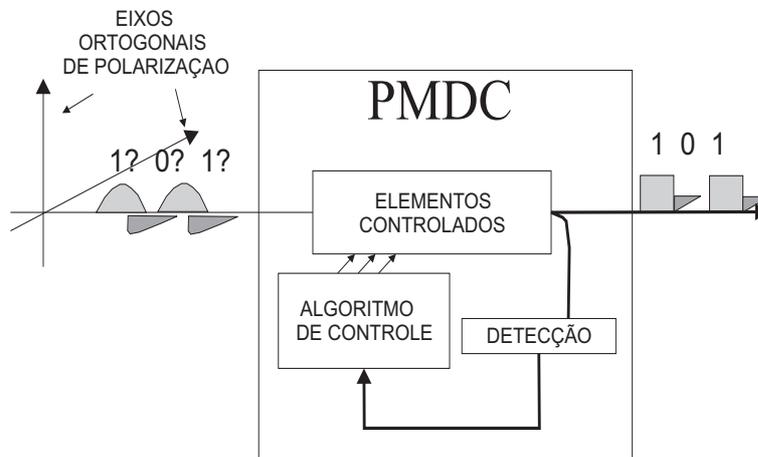


Figura 3.1: Representação gráfica da atuação de um compensador de PMD num pulso óptico com dispersão.

### MID-SPAN

Para sistemas com múltiplos comprimentos de onda, o desafio da compensação de PMD aumenta devido às características individuais de cada canal.

Em [37], Eiselt *et al.* publicou uma idéia para compensação de PMD em sistemas de múltiplos comprimentos de onda. Num sistema de transmissão óptica, onde um transmissor e um receptor estão conectados por uma fibra óptica birrefringente, a mudança do estado de polarização do sinal óptico no transmissor irá causar uma mudança no perfil da PMD do sinal óptico no receptor. Ele propôs dividir o enlace de fibra em duas partes de comprimento equivalente e colocar entre essas duas partes um compensador, criando a possibilidade de manipular o estado de polarização do sinal óptico de modo que a PMD produzida pela segunda metade da fibra possa corrigir a PMD produzida na primeira metade.

A partir deste trabalho, foi desenvolvida uma técnica de compensação, chamada de *Mid-span*, e apresentada em [48], onde é proposto um esquema de mitigação de PMD para múltiplos canais que requer somente um controlador de polarização localizado no meio do enlace, e um canal de realimentação de banda estreita ligando o receptor ao *mid-span*, conforme mostrado na Figura 3.2.

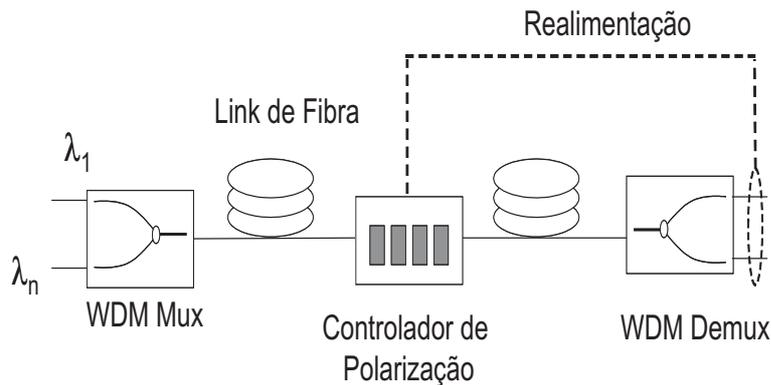


Figura 3.2: Esquema para utilização da técnica *Mid-span*.

Seguindo a idéia apresentada acima, foram realizadas algumas simulações visando compensar PMD em um sistema afetado por esse problema. As simulações seguiram o esquema mostrado na Figura 3.2.

Múltiplos comprimentos de onda são combinados em um multiplexador e lançados numa fibra com PMD total de  $\sim 3,2$  ps, dividida em duas partes por um controlador de polarização composto de duas lâminas, a primeira posicionada a  $0^\circ$  e a segunda a  $45^\circ$  em relação ao sinal de entrada no polarizador. Cada parte da fibra tem DGD médio igual a  $2,5$  ps, são diferentes entre si e são resultado da concatenação de 100 pedaços de tamanhos aleatórios e com acoplamentos aleatórios.

Após a demultiplexação, o sinal de todos os canais é analisado e o canal de realimentação retorna ao controlador de polarização as mudanças que ele deve realizar. A otimização é feita considerando-se que o canal que apresenta a pior performance sempre pode ser melhorado. Assim, durante todo o tempo, o sistema analisa a necessidade da compensação. Caso o pior canal já tenha sido otimizado à melhor situação, então é considerado que, naquele instante de tempo, o sistema foi otimizado e o tempo sofre um acréscimo, reiniciando a otimização para este novo instante. Dentro do *loop* de otimização existe um critério de parada, acionado sempre que o número de repetições desse *loop* atingir um valor máximo determinado. Vale salientar que esse critério não foi atingido em nenhuma das simulações observadas. A saída do programa de otimização fornece então, valores de RF otimizados para os múltiplos canais inseridos na entrada do sistema.

### Misturadores de Polarização

Um misturador de polarização é um elemento que atua ativamente para modificar o estado de polarização do sinal através de métodos de modulação da polarização. Existem diferentes tecnologias para a construção desses misturadores, entre elas a utilização de piezos-elétricos que pressionam a fibra radialmente e que induzem birrefringência através de efeito foto-elástico. Um benefício desse tipo de misturador é o baixo valor de perda de inserção, baixa PDL e custo baixo.

Neste trabalho foram feitos alguns testes com a utilização de misturadores. A escolha da frequência do misturador de polarização é um fator importante, pois geralmente é desejado que este elemento consiga variar a polarização cobrindo toda a esfera de Poincaré, visitando assim a “totalidade” dos estados de polarização.

Para conseguir uma relação de transferência satisfatória para o misturador de polarização, um determinado sinal de entrada,  $S_{in}$ , foi escolhido e mantido fixo enquanto a matriz que representa o misturador de polarização teve seus parâmetros analisados:

$$S_{out} = M * S_{in} \quad (3-14)$$

onde  $M$  é a matriz de transferência do misturador de polarização e  $S_{out}$  é o sinal de saída.

O misturador de polarização é formado por lâminas birrefringentes, com auto-estados lineares genéricos, que podem ser descritas em termo dos vetores de Jones, da seguinte forma [30]:

$$V = \begin{pmatrix} \cos(\phi/2) + j \sin(\phi/2) & j \sin(2\phi) \sin(\phi/2) \\ j \sin(2\phi) \sin(\phi/2) & \cos(\phi/2) - j \sin(\phi/2) \end{pmatrix} \quad (3-15)$$

No caso particular em que estes auto-estados são vetores lineares, horizontal e vertical, a matriz é reduzida a:

$$M_0(\phi, 0) = \begin{pmatrix} e^{j\frac{\phi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\phi}{2}} \end{pmatrix} \quad (3-16)$$

com auto-estados iguais a:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

onde  $\phi$  é a diferença de fase entre os auto-estados. Na esfera de Poincaré, esta lâmina de onda transforma o SOP incidente em uma volta no sentido anti-horário de ângulo  $\phi$  em torno do eixo formado por  $S_3$ , no plano do equador da esfera de Poincaré [30].

No caso da lâmina apresentar auto-estados inclinados de  $\pm 45^\circ$  em relação à direção horizontal, a matriz de Jones representativa é:

$$M_{45}(\phi, 45) = \begin{pmatrix} \cos(\phi/2) & j \sin(\phi/2) \\ j \sin(\phi/2) & \cos(\phi/2) \end{pmatrix} \quad (3-18)$$

com auto-estados:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

Esta lâmina de onda roda qualquer SOP em torno do eixo formado por  $S_2$  e/ou  $S_1$ .

A princípio foi testado o número de lâminas a ser utilizado e também o tamanho do passo para incremento do ângulo da matriz da lâmina. Foram testadas 2 e 3 lâminas e a escolha dessa quantidade foi feita levando-se em consideração o sistema a ser simulado. O passo de variação do misturador é contínuo temporal, dado por  $\theta = \theta + \delta$ , onde  $\theta$  é o ângulo de rotação dos atuadores piezo-elétricos. Neste ponto, não existe a preocupação de se gerar um sistema de atuação que tenha que reinicializar as lâminas, e o

incremento pode aumentar indiscriminadamente. As velocidades de atuação de cada uma das lâminas foram escolhidas para que a primeira seja a mais lenta, completando uma volta completa na esfera, e que a segunda tenha uma velocidade intermediária entre a primeira e a terceira.

Ao fim dos testes foi encontrada uma relação satisfatória, que cobriu a esfera completamente e que, a princípio, não sobrecarrega o sistema com processamentos desnecessários, conforme apresentado na Figura 3.3. Para este resultado, o sistema simulado computacionalmente foi composto de um transmissor conectado em série com 3 lâminas birrefringentes, uma fibra e um receptor. Essas lâminas foram dispostas a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $0^\circ$ . O misturador de polarização foi utilizado em dois sistemas, sendo que, no primeiro deles foi combinado com a utilização de FEC e, no segundo, ao FEC e também a um compensador.

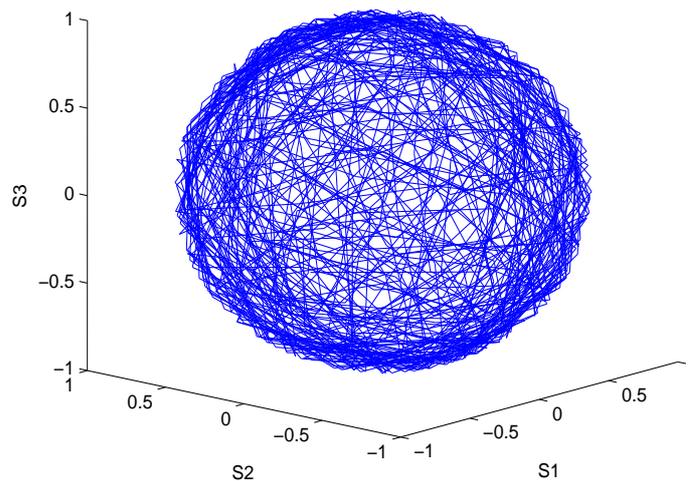


Figura 3.3: Uniformidade na distribuição da polarização na esfera de Poincaré, para um misturador de polarização contendo três lâminas.

Para ilustrar mais detalhadamente a utilização do misturador de polarização, é mostrada, na Figura 3.4, a evolução temporal do DGD, para uma fibra com PMD igual a  $13 \text{ ps}$ , e a correspondente evolução da potência de RF. Nessa simulação foi considerado um sistema simplificado composto por um transmissor, uma fibra e um receptor conectados em série. É perceptível que nos pontos onde o DGD apresenta maior valor, acontecem os maiores valores de desvanecimento do RF. E, dependendo da duração desses eventos, onde o DGD assume um valor muito grande e permanece nessa situação, a utilização do FEC, que é uma técnica de correção de erros,

fica impossibilitada. Uma solução para esse problema é a utilização de um misturador de polarização, conforme publicado em [49], para variar o estado de polarização do sinal de entrada.

A Figura 3.5 mostra a potência do sinal de RF, previamente apresentada na Figura 3.4, porém com um misturador de polarização colocado na entrada da fibra. Neste exemplo, um determinado  $S_{in}$  fixo é lançado pelo transmissor e passa pelo misturador de polarização, composto de três lâminas de onda, que está localizado antes da fibra de transmissão. É visível que, tanto as flutuações do valor médio, quanto do pico-a-pico variam de acordo com a variação temporal do DGD nas fibras. Com a utilização do misturador de polarização, o sinal de RF “visita” valores abaixo de um determinado limiar por várias vezes, mas fica abaixo desse limiar por um tempo menor, dependendo da frequência de modulação do RF inserido pelo misturador.

Nesse trabalho, não houve a preocupação com o fenômeno de *jitter*, inserido pela variação dos misturadores de polarização. De fato, é reportado em [41], que esse problema afeta realmente apenas sistemas cuja PMD seja alta ( $> 50 ps$ ).

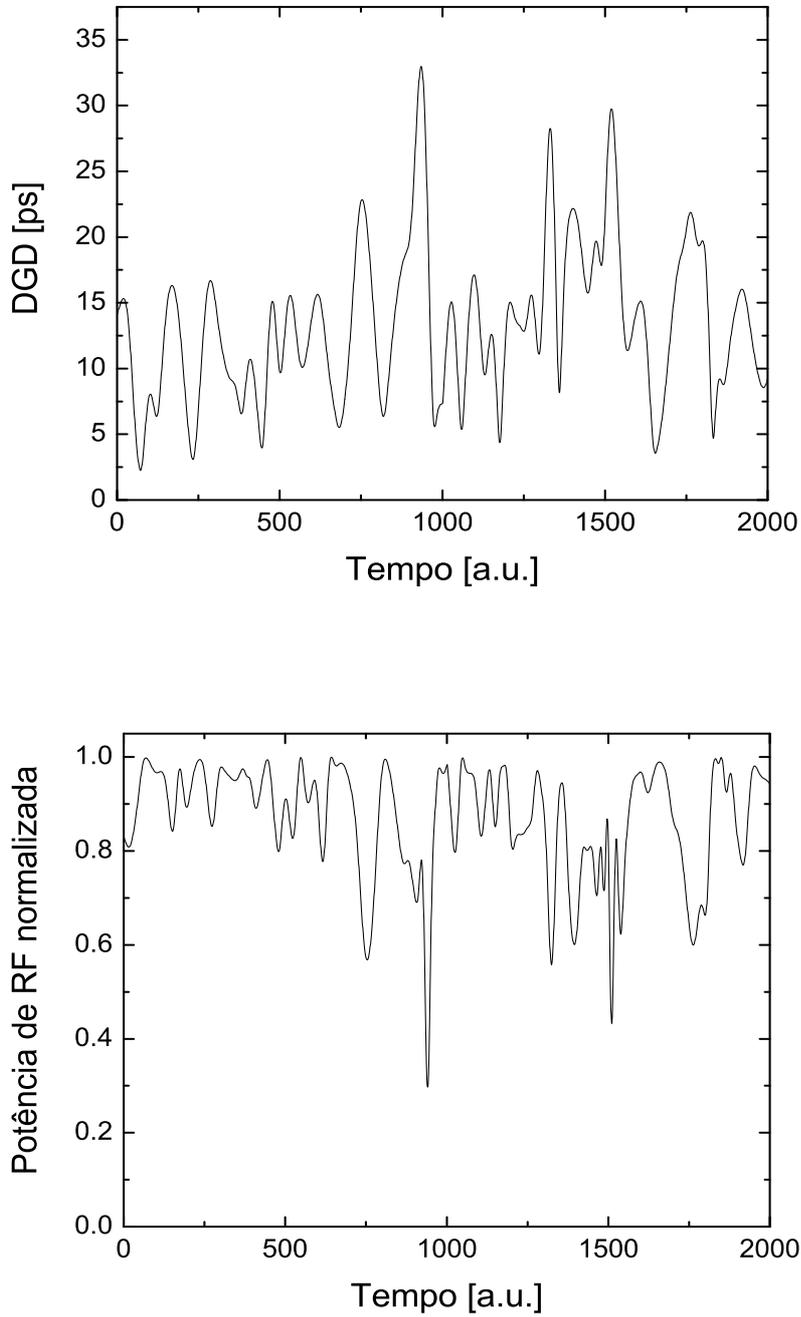


Figura 3.4: Evolução do DGD ao longo do tempo e a correspondente evolução do sinal de RF.

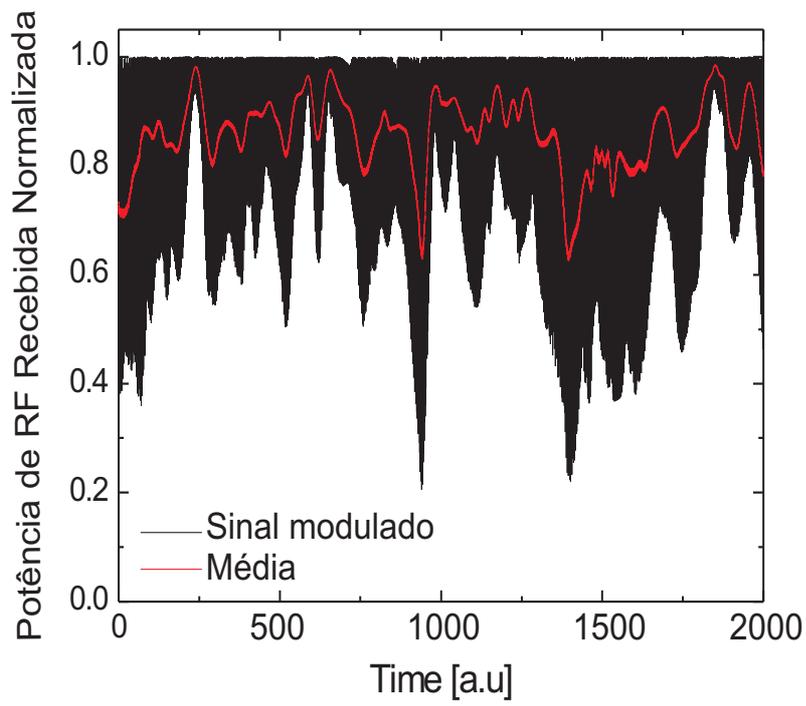


Figura 3.5: RF apresentado na Figura 3.4, sofrendo atuação de misturador de polarização.

## FEC

FEC (*Forward Error Correction*) é um sistema de controle de erros para transmissão de dados, onde o transmissor adiciona dados redundantes na própria mensagem para permitir que o receptor detecte e corrija erros que possam ocorrer durante a transmissão, sem a necessidade de reenvio de informação.

A história destes códigos corretores de erro teve início no final dos anos 40 com a invenção do *Código Hamming* [58]. Enquanto esta tecnologia foi amplamente usada em sistemas de comunicação via satélite, as primeiras publicações com ênfase em sistemas de comunicações ópticas só apareceram no final da década de 80, devido à alta performance exigida por esses sistemas.

Conforme dito anteriormente, o princípio dessa técnica consiste em incluir símbolos (ou *bits*) redundantes nos blocos de informação, objetivando permitir a recuperação da informação, ainda que alguns símbolos do bloco estendido sejam corrompidos durante a transmissão. Deste modo, para cada  $K$  *bits* de informação, são transmitidos  $N$  *bits*, sendo estes  $N - K$  *bits* redundantes escolhidos de forma que se possa detectar e corrigir erros eventualmente introduzidos pelo canal. Para manter a mesma taxa de *bits* de informação por segundo, no entanto, a redundância introduzida pela codificação provoca a expansão da banda passante necessária para a transmissão.

Na figura abaixo é ilustrada uma palavra-código a ser transmitida, já com os dados de redundância inseridos [28].

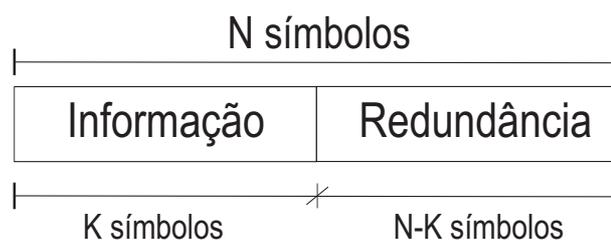


Figura 3.6: Palavra-código contendo os dados a serem transmitidos e os *bits* de redundância, utilizados para correção de erros.

O FEC foi desenvolvido para atuar em sistemas com erros aleatórios, entretanto, apesar da PMD ser um fenômeno aleatório, ela apresenta variações relativamente lentas, que introduzem erros em longas rajadas que não podem ser corrigidos pelo FEC. Uma solução para tentar minimizar o problema é introduzir no sistema um misturador de polarização que acelere a dinâmica do sistema, variando o estado do sinal de entrada mais

rapidamente, de forma que a PMD apenas afete um número limitado de símbolos por quadro do FEC. Alguns trabalhos foram publicados propondo a combinação de FEC e misturador de polarização [20], [42], [49].

A idéia é que para um dado código FEC, exista um número máximo de erros corrigíveis por quadro do FEC  $N_{max\quad quadro}$ . Existe também um número máximo de erros consecutivos, em rajada, que pode ser corrigido,  $N_{max\quad rajada}$ , que também é chamado de BECL (*Burst Error Correction Length*) e que geralmente é menor ou igual a  $N_{max\quad quadro}$ . O FEC é incapaz de corrigir erros, e pode até aumentar o número de ocorrência destes, quando os erros acontecem tão frequentemente que, durante cada período do quadro do FEC, o número de erros excede  $N_{max\quad quadro}$ , ou ocorre consecutivamente mais que  $N_{max\quad rajada}$ . Esses eventos, durante os quais o sistema falha devido à PMD, são chamados de *eventos de interrupção* e o tempo que o sistema permanece nestes eventos é chamado de *tempo de interrupção*.

### Utilização de FEC e Misturador de Polarização

Conforme explicado na seção 3.2.2, o FEC é uma técnica de correção de erros. Recentemente, foi proposta uma abordagem para compensação de PMD com a utilização de elementos misturadores de polarização, juntamente com códigos corretores de erro (FEC) [41], [49] e [43]. O objetivo de utilizar misturadores de polarização, de acordo com o apresentado na seção anterior, é fazer com que o vetor  $\Omega$  de PMD do sistema seja sempre variado e, portanto, permaneça em limiares inaceitáveis para o sistema por tempos menores que os limites de atuação do código corretor de erro.

Para simular a utilização desses misturadores foi desenvolvida uma ferramenta que considera um sistema formado por fibras e controladores de polarização, onde a variação dos controladores piezo-elétrico faz com que o DGD do sistema varie rapidamente e, conseqüentemente, visite diversos valores, não permanecendo numa situação ruim por muito tempo.

### Utilização de FEC, Misturador de Polarização e Controlador de Polarização

Um próximo passo, para o estudo da compensação de PMD, foi a inserção de um elemento birrefringente após a linha de transmissão. O princípio é adicionar PMD à já existente PMD do sistema, de forma a cancelar os efeitos da PMD total no sinal óptico transmitido, isto com a ajuda de um controlador de polarização que alinha o sinal de maneira que

a PMD inserida seja cancelada. Um exemplo da aplicação deste tipo de compensador é mostrado em [4].

O sistema simulado tem seu esquema mostrado na Figura 3.7. O misturador de polarização é inserido na entrada do enlace de fibra. No receptor, um controlador de polarização é colocado em série entre o enlace de fibra e uma linha de atraso (DL). Após a linha de atraso, uma parte do sinal óptico é enviada a um detector (D), que dá o sinal correspondente ao valor médio da potência de RF e a amplitude de modulação do RF. Estes dois valores alimentam um algoritmo de controle que visa colocar a média do sinal no valor máximo e a amplitude da modulação no valor mínimo [56].

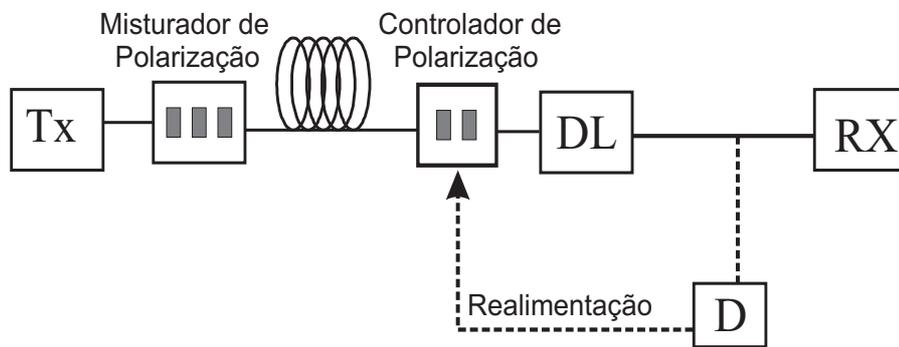


Figura 3.7: Esquema utilizado para simulação de um sistema de compensação de PMD com a utilização de FEC, misturador de polarização e um elemento de controle de polarização.