4
Resultados

Este capítulo mostra os resultados obtidos com a utilização do simulador desenvolvido. A princípio, são mostrados resultados que validam o *software* e, em seguida, resultados relevantes para o objetivo do trabalho.

4.1
Validação do Simulador Temporal

A primeira preocupação, após o desenvolvimento do *software*, foi validar os resultados obtidos. Para tanto, foram realizadas comparações destes, com resultados de simulações espectrais, já sabidamente conhecidos [29]. Na Figura 4.1 é apresentado um gráfico com a variação típica do DGD em função do comprimento de onda. Estes dados foram simulados a partir da equação 3-2, apresentada na seção 3.1. E, na Figura 4.2, é apresentado um gráfico de DGD em função da evolução temporal contínua, gerado a partir do *software* desenvolvido, equação 3-3, apresentado na seção 3.1. Ambos os gráficos mostram uma variação semelhante no comportamento do DGD, conforme esperado.

Devido ao caráter aleatório do DGD, a representação estatística é bastante apropriada para caracterizar as informações obtidas. Na Figura 4.3, é apresentada a estatística de distribuição de probabilidade da variação do DGD em função da variação temporal, conforme dados apresentados na Figura 4.2, juntamente com o ajuste Maxwelliano. A distribuição Maxwelliana é considerada o modelo clássico para caracterização do DGD [29] e a concordância entre os dados gerados e a curva de ajuste asseguram que os dados obtidos através do *software* são coerentes com a teoria conhecida.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

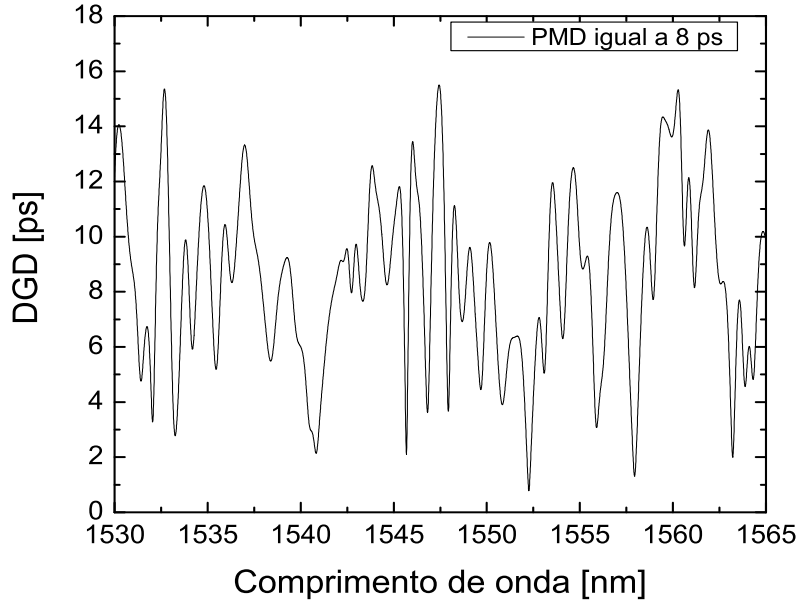

Figura 4.1: Simulação da evolução espectral do DGD para uma fibra com PMD igual a 8 *ps*.

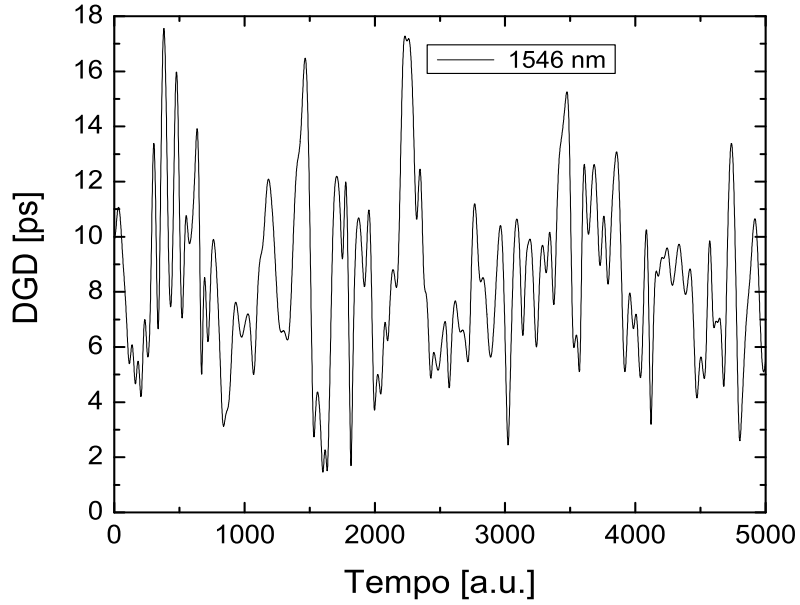

Figura 4.2: Simulação da evolução temporal do DGD para uma fibra com PMD igual a 8 *ps*.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

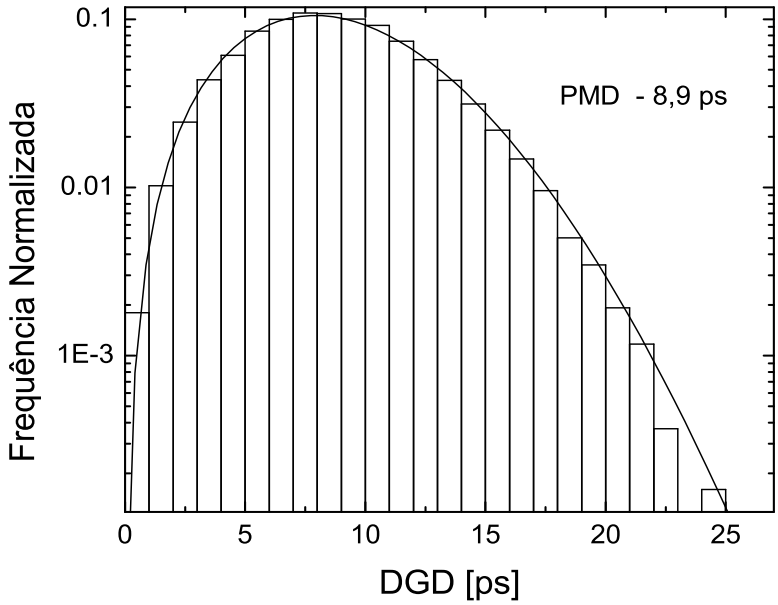

Figura 4.3: Estatística dos dados apresentados na Figura 4.2. A linha sólida mostra o ajuste Maxwelliano.

Um dos objetivos deste trabalho é realizar um estudo da PMD para sistemas de múltiplos comprimentos de onda e, portanto, uma das análises consideradas é a representação dos dados em função da autocorrelação ao longo do comprimento de onda, permitindo assim observar de que forma os canais se relacionam. Na Figura 4.4 é apresentada a função de autocorrelação para quatro valores diferentes de PMD. Esses dados foram gerados a partir de **simulações espectrais**, seção 3.1. Conforme o valor da PMD aumenta e, consequentemente, o comportamento do DGD se torna mais "ruidoso", a correlação entre os canais vizinhos diminui, conclusão de acordo com o apresentado em [19].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

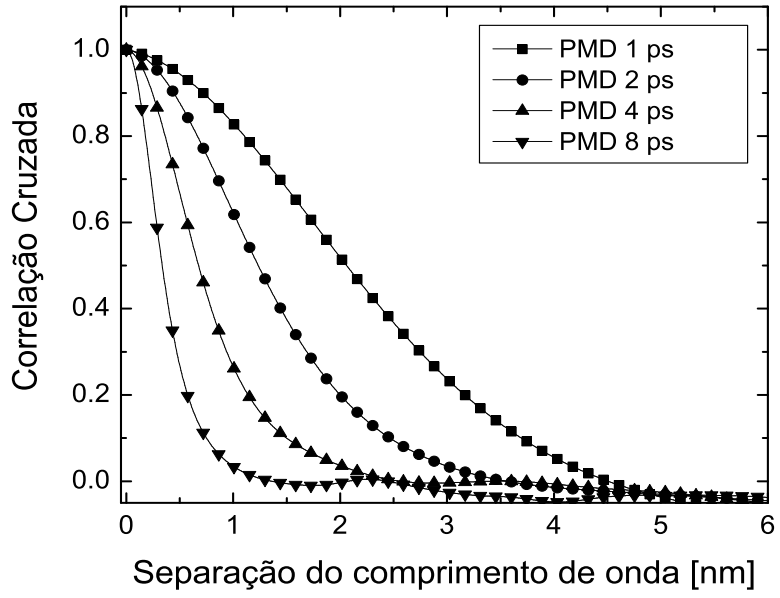

Figura 4.4: Função de correlação espectral do DGD. Dados gerados a partir de simulações com variação espectral.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

Os dados principais deste trabalho, entretanto, apresentam variação temporal e, portanto, foram manipulados para fornecer as informações na forma desejada.

A Figura 4.5 apresenta a autocorrelação temporal do DGD para um determinado comprimento de onda e a correlação cruzada para dois canais espaçados por 0,5 *nm*. Os dados apresentados são para uma PMD igual a 8 *ps*. Essas funções de correlação temporal são obtidas diretamente a partir de dados iguais aos apresentados na Figura 4.2. Vale reforçar que os cálculos para todos os comprimentos de onda são feitos antes que um novo "passo temporal" seja adicionado, garantindo assim, que todos os comprimentos de onda viajam pela fibra sob as mesmas condições. Se o espaçamento entre canais for aumentado regularmente, e mantendo-se um canal inicial fixo, é possível obter curvas de correlação cruzada que terão uma queda no seu valor máximo, à medida que o espaçamento aumenta. É possível, então, pegar apenas os valores máximos de cada curva de correlação, conforme indicado na Figura 4.5, e assim obter um gráfico de correlação em função da variação do comprimento de onda a partir de dados temporais, conforme mostrado na Figura 4.6.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

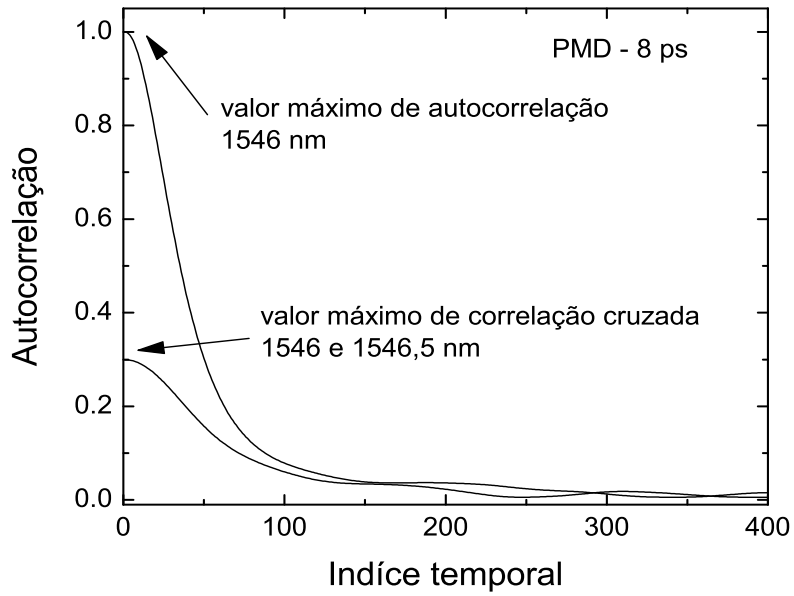

Figura 4.5: Função de correlação temporal do DGD. Dados gerados a partir de simulações com variação temporal.

Nas Figuras 4.4 e 4.6 são mostrados resultados de DGD em função do espaçamento do comprimento de onda que podem ser comparados mesmo

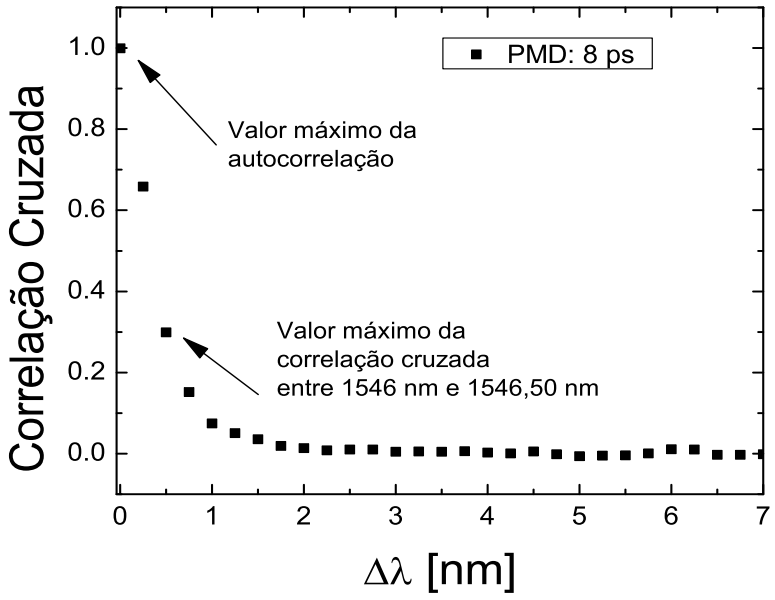

Figura 4.6: Dependência espectral de dados gerados a partir de variação temporal.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

tendo sido gerados de maneiras diferentes, o primeiro a partir da **simulação espectral** (método convencional) e outro gerado a partir dos dados de **simulação temporal**. A comparação entre correlação do DGD em função da variação do comprimento de onda para dados gerados com variação espectral e com variação temporal é mostrada na Figura 4.7, para uma PMD igual a 1 ps. Nota-se um desacordo entre as duas curvas. Este desacordo é atribuído a uma estatística pobre nas simulações espectrais, que foram geradas em janelas espectrais de 80 nm. Porém, quando o tamanho da faixa de variação espectral dessa janela foi aumentado, o acordo entre as duas curvas torna-se excelente, chegando-se a um resultdo ótimo para janelas espectrais de 600 nm de variação de comprimento de onda. Vale ressaltar que uma medida espectral numa faixa tão larga não é realista. Também é importante dizer que esse desacordo foi percebido para baixos valores de PMD (≤ 2 ps).

Na Figura 4.8 são mostrados resultados de correlação do DGD em função da variação do comprimento de onda para **simulações espectrais** e **simulações temporais** para 4 valores de PMD. Os resultados para 1 e 2 ps foram simulados com um espectro de 600 nm, enquanto que para 4 e 8 ps, uma variação espectral de 80 nm foi suficiente. Isto significa que as técnicas espectrais de medida da PMD tendem a fornecer estatísticas mais

pobres no caso de PMD pequena, subestimando a correlação entre canais WDM. Também é possível notar, a partir da Figura 4.8, que um sistema WDM com espaçamento de 100 GHz, ou seja, 0,8 nm, apresenta correlação baixa para um valor de PMD igual a 8 ps, mas para valores menores, como 2 ps, apresenta um nível de correlação bastante superior.

De um modo geral, os resultados simulados mostram que os canais WDM se descorrelacionam muito rapidamente no caso das PMD's mais altas, justamente aquelas que afetam as transmissões em 10 Gb/s. No caso de transmissões em 40 Gb/s, canais vizinhos, espaçados de 0,8 nm, terão uma correlação de aproximadamente 50% para uma PMD de 4 ps.

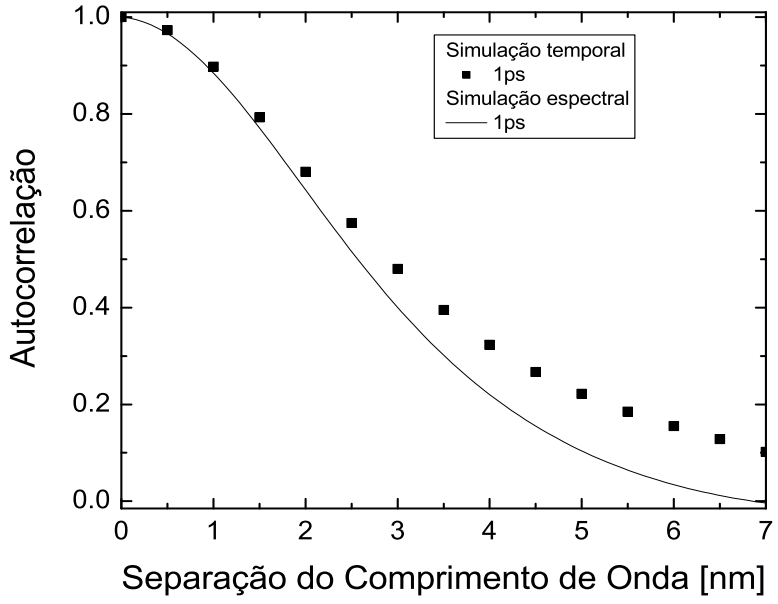

Figura 4.7: Função de Autocorrelação Espectral a partir de simulação espectral (linha) e simulação temporal (símbolo).

Os dados mostrados na Figura 4.8 foram comparados com o resultado analítico apresentado em [19] e o ajuste entre eles é mostrado na Figura 4.9:

$$\langle \tau_{z,w}\tau_{z,w'}\rangle = \frac{3\pi-8}{\pi}\left\{\frac{2}{\Delta\omega^2} - \frac{6}{\Delta\omega^4\langle\tau^2\rangle} * [1 - exp(-\Delta\omega^2\langle\tau^2\rangle/3)]\right\} + \frac{8}{3\pi}\langle\tau^2\rangle \quad (4\text{-}1)$$

onde $\Delta\omega = w - w'$ e τ é o valor do DGD médio.

Vale esclarecer que foi necessário utilizar a relação entre o DGD médio e o DGD médio quadrado, apresentada abaixo:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

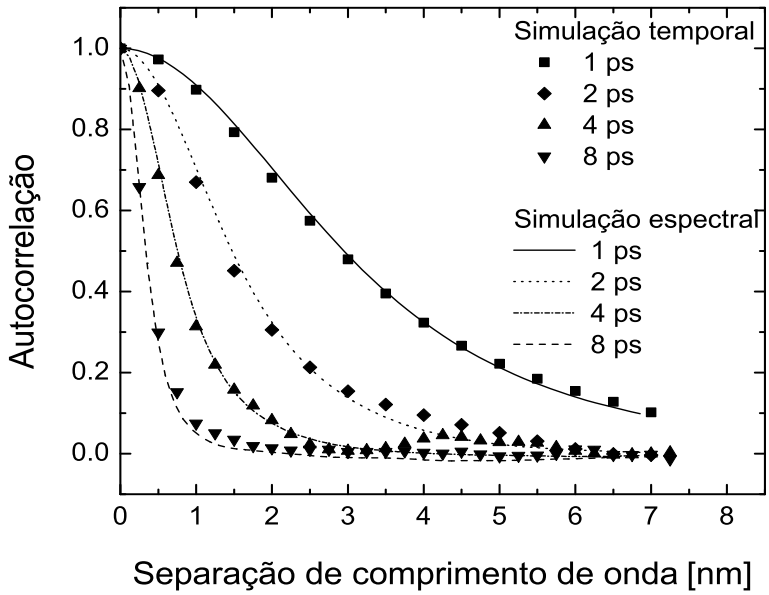

Figura 4.8: Função de Autocorrelação Espectral a partir de simulação espectral (linhas) e simulação temporal (símbolos).

$$\langle \tau^2 \rangle = \frac{3\pi}{8} \langle \tau \rangle^2 \tag{4-2}$$

O resultado mostrado na Figura 4.9 é bastante importante no esforço de validar o trabalho, pois a equivalência encontrada entre os dados encontrados e dados já publicados [19] é excelente. Esta figura mostra que as propriedades estatísticas da PMD podem ser definidas pelo DGD médio, sendo então, este parâmetro, uma especificação muito importante para as fibras ópticas [19].

Outra comparação é mostrada na Figura 4.10, onde o *software* foi utilizado para gerar dados de DGD utilizando diferentes configurações de fibras. Foram variados 2 parâmetros: o número de seções que formam a fibra/emulador e a forma com que estes pedaços são acoplados. São apresentados dados de fibras com 10 e 100 pedaços e o acoplamento de ângulos foi gerado com distribuição normal entre 0 e 2π ou com distribuição em torno dos 45^o, com variação de 3%. É visível, conforme conhecido na literatura [22], que quanto menor o número de seções, mais pobre é a estatística obtida, fazendo com que o ajuste estatístico com a curva Maxweliana seja ruim. Para uma fibra com 100 seções, entretanto, a proximidade com o ajuste Maxweliano é muito mais clara. No trabalho

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

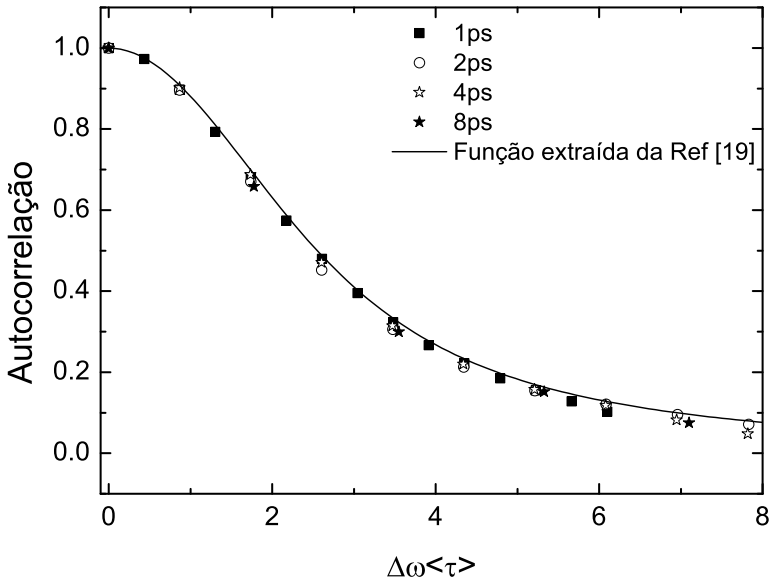

Figura 4.9: Função de Autocorrelação do DGD.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

citado [22], é informado que um valor mínimo para seções é de 15 seções. Também de acordo com [22], quando o acoplamento dos pedaços fica em torno de 45^o, a estatística é melhor. E quanto maior o número de seções, mais robusta é a distribuição estatística em face da escolha dos acoplamentos. Aqui, para 100 seções, os dois tipos de acoplamento se mostram similares até probabilidades em torno de 10^{-4}.

Além do cálculo do DGD, o *software* também permite o cálculo do PSP e, na Figura 4.11, é apresentada uma comparação entre essas duas grandezas, para diferentes valores de PMD. Foi mostrada a correlação ao longo do tempo, e é possível observar que o DGD se descorrelaciona mais lentamente que o PSP, para canais vizinhos. Este efeito também foi observado em [44], através de cálculos analíticos, e pode ser explicado pelo fato do PSP ser uma variável bi-dimensional enquanto o DGD é uni-dimensional, possuindo portanto, menos variáveis para descorrelação. Esses resultados foram apresentados em [50].

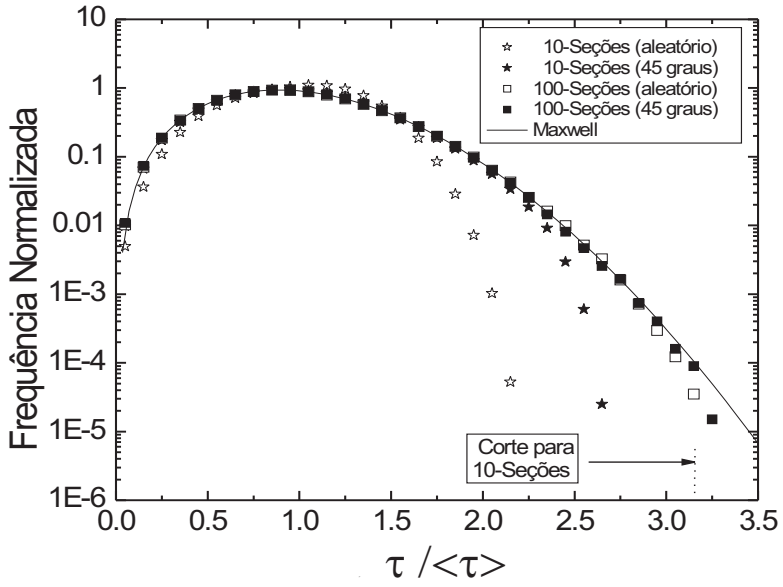

Figura 4.10: Função densidade probabilidade do DGD para simulações temporais (símbolos) para fibras resultantes da concatenação de 10 e 100 seções de fibra, com diferentes ângulos de acoplamento. A linha representa a distribuição Mawxelliana.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

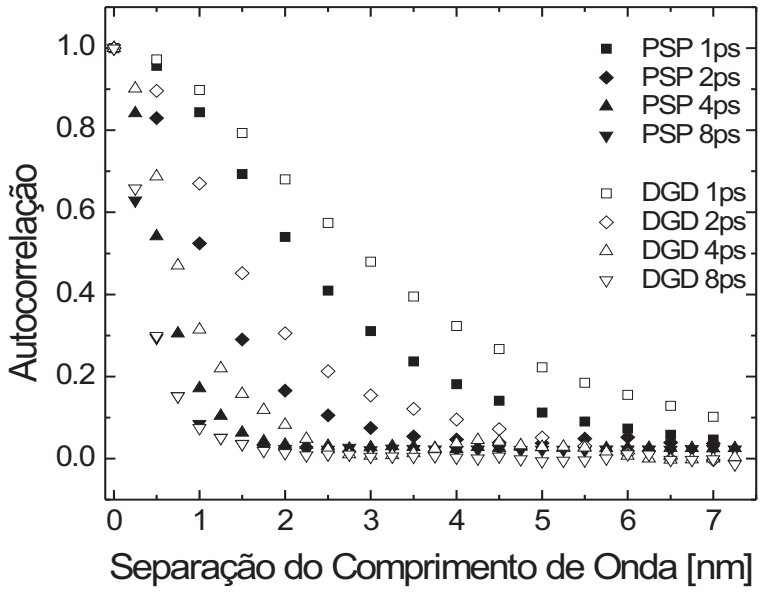

Figura 4.11: Função autocorrelação do DGD (símbolos brancos) e PSP (símbolos pretos). Símbolos iguais correspondem a um mesmo valor de PMD.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

4.2
Hinge Model

As primeiras simulações de *hinge model* testaram o uso de misturadores de polarização e de fibras atuando como *hinges*. Foram conectados em série, fibras de 1 *ps*, que apresentavam variação lenta do DGD, com fibras de 1 *ps* com variação rápida e também com os misturadores de polarização. A PMD das fibras "congeladas" variou lentamente, enquanto os *hinges* provocaram variações rápidas, cobrindo toda a esfera de Poincaré. A Figura 4.12 mostra uma comparação dos resultados obtidos. Foi simulado um sistema com 4 *hinges*, composto de 5 fibras de 1 *ps* e, entre elas, 4 misturadores de polarização de 3 lâminas ou 4 fibras de 1 *ps*. Ambos os casos mostram um comportamento parecido, havendo entretanto, um "deslocamento da curva", no caso da utilização das 4 fibras de 1 *ps*. Essa variação entre as duas curvas, ou seja, uma diferença no valor do DGD médio, é devido a PMD adicional que é inserida para o caso que utiliza fibras no lugar dos misturadores de polarização.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

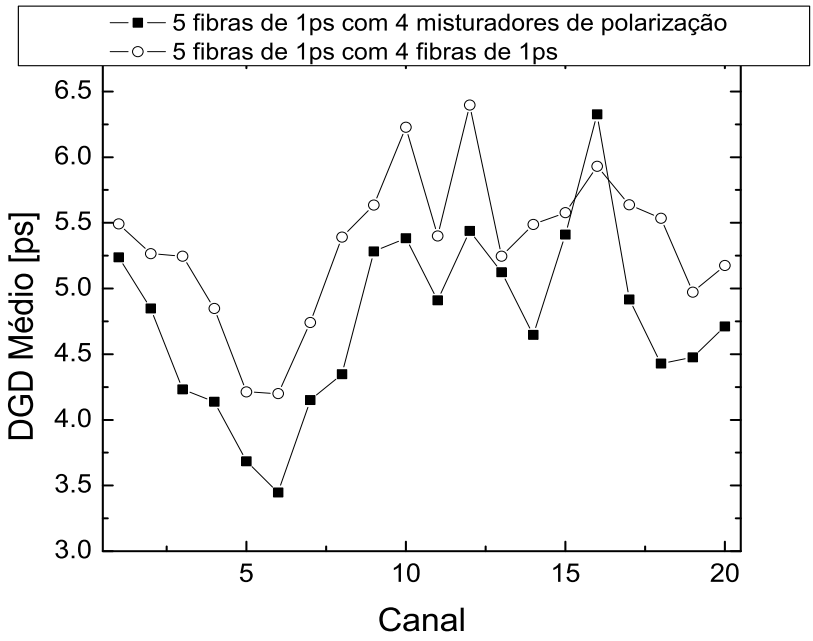

Figura 4.12: Variação do DGD médio para diferentes canais WDM para um sistema com piezos e fibras no lugar dos *hinges*.

Para a utilização de fibras representando *hinges*, é ideal que se disponha de uma grande quantidade de dados, pois é desejável que a variação do PSP provocada pelos *hinges* seja maior que as variações devido ao com-

portamento das "fibras congeladas". Para representar esses *hinges* foram testadas a utilização de fibras e de misturadores de polarização. Como o resultado foi bastante parecido para os dois casos, foi escolhido trabalhar com os misturadores de polarização, pois esses apresentam a facilidade da variação instantânea da posição dos atuadores piezo-elétricos, sem a sobrecarga computacional de se carregar os dados de fibra pré-gerados.

Na Figura 4.13, é mostrado o DGD médio de vários canais ao longo do tempo. A pdf (*probability density function* - função densidade probabilidade) dos DGD´s para cada canal é muito diferente da curva maxwelliana, devido ao pequeno número de *hinges*, mas a média do DGD tem uma variação muito próxima ao mostrado em [16] e [40].

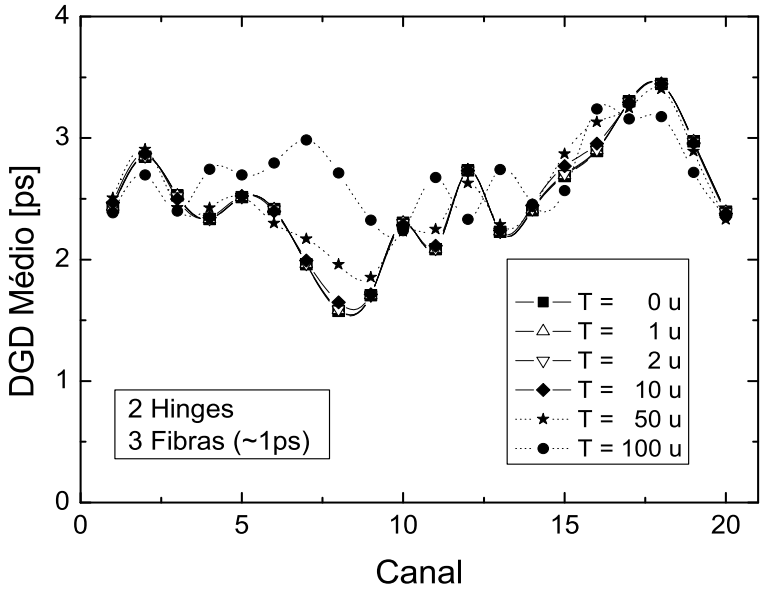

Figura 4.13: Variação do DGD médio para diferentes canais WDM para uma transmissão em um sistema contendo 2 *hinges* e 3 fibras de 1 *ps* de PMD cada.

É interessante mostrar que, conforme publicado em [51], alguns valores de DGD chegam a ser o dobro de outros canais. No trabalho citado, os dados são obtidos através de medidas. Na Tabela 4.1, é mostrado um resultado obtido através de simulações temporais, onde o DGD médio para 20 canais varia em até 100 %.

No *hinge model*, cada canal vê uma distribuição diferente para o DGD (determinada principalmente pela escala de tempo rápida dos *hinges*). É

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DGD médio [ps]	4,17	4,83	3,60	3,00	3,33	3,92	3,86	3,96	3,22	2,49
Canal	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
DGD médio [ps]	5,20	3,06	4,97	4,58	4,13	4,03	3,79	4,12	3,40	3,23

Tabela 4.1: DGD para 20 canais para *hinge model*.

possível, então, plotar o valor médio do DGD e seu desvio padrão para os canais, conforme mostrado na Figura 4.14. Nesta figura, foi realizada uma média ao longo dos 20 canais simulados, obtendo assim uma média espectral ao longo do tempo, conforme mostrado na Figura4.15. O espalhamento da média do DGD varia de acordo com o tempo, logo, os canais terão um comportamento de correlação diferente, dependendo se a distribuição é mais ou menos larga. O espalhamento médio do DGD se torna menor à medida que o número de *hinges* aumenta, resultado semelhante ao apresentado em [39].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

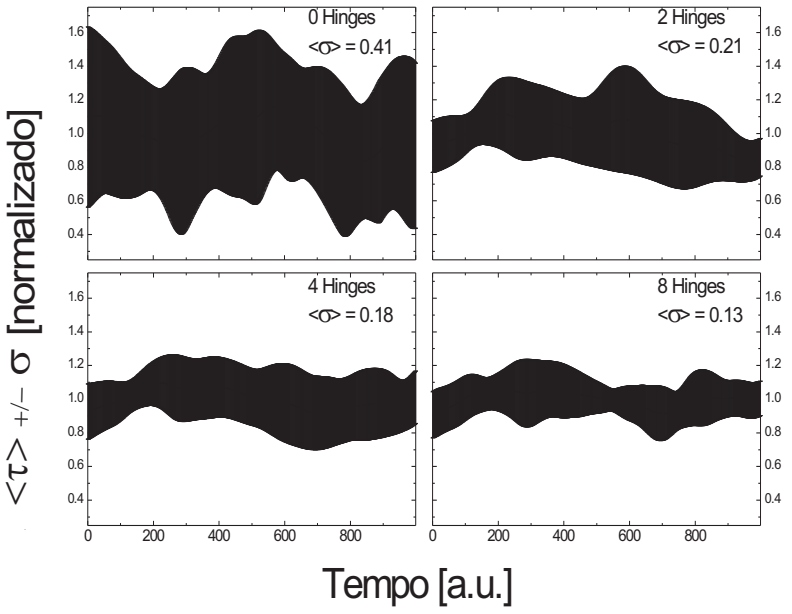

Figura 4.14: Evolução temporal do DGD médio e seu desvio padrão para diferentes números de *hinges*.

Uma abordagem que pode ser considerada, utilizando os dados de *hinge model*, é o estudo de falha de sistema, ou seja, quando o nível de sinal fica abaixo de um determinado valor e a transmissão simplesmente é interrompida devido a erros que inutilizam o sinal. É possível especular sobre

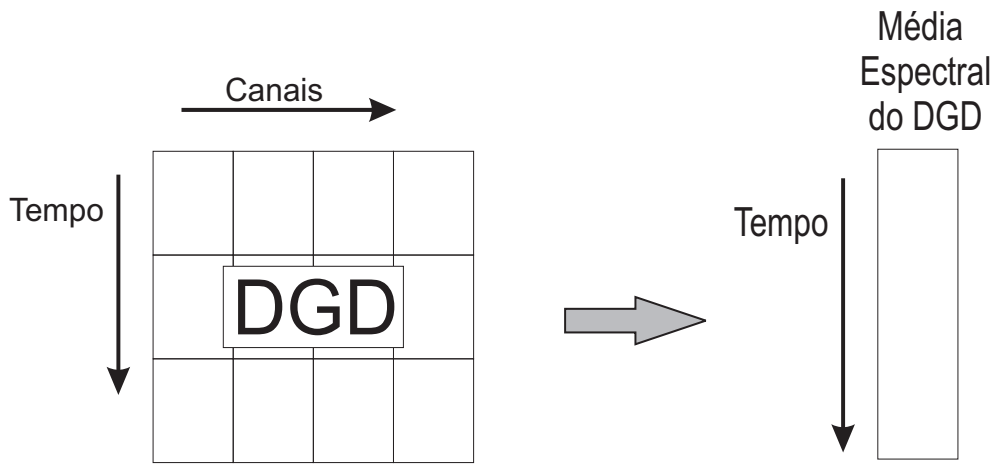

Figura 4.15: Manipulação dos dados simulados.

quanto tempo o sistema permanece em situações de falha, uma vez que ele tenha entrado nesta situação. Na Figura 4.17, é mostrada a probabilidade da duração de eventos de falha juntamente com a evolução temporal do DGD correspondente ao evento mais longo. A probabilidade de que estes eventos ruins aconteçam, cai de 10^{-4} para 10^{-5} quando o nível máximo, aceito para o DGD, varia de $2 < \tau >$ para $2,5 < \tau >$ e mais de uma ordem de magnitude quando varia para $3 < \tau >$. Mesmo assim, a duração do evento é considerada alta ($\sim 40u$) mesmo para o caso com maior DGD.

Utilizando as simulações no domínio do tempo, é possível ajustar a escala de tempo desses resultados com a escala de tempo de flutuações observadas numa fibra instalada e determinar a estatística da duração de eventos de falha, através de comparações com medidas já realizadas.

Os gráficos gerados com **simulações temporais** são em função da passagem de tempo, Δt. É possível, entretanto, realizar uma associação entre os dados gerados nesse trabalho com uma unidade real de medida temporal (horas, minutos ou segundos), a partir de dados medidos da evolução da PMD ao longo do tempo. Para tanto, foram escolhidos 2 trabalhos, [35] e [59], que reportavam medidas de PMD em função do tempo. A Figura 4.16 mostra os dois gráficos escolhidos.

Para cada um dos gráficos apresentados acima, foi encontrada a função de autocorrelação do gráfico ao longo do tempo. Essa figura de autocorrelação em função do tempo, para dados medidos, foi comparada com um gráfico de autocorrelação gerado a partir de simulações temporais. Vale ressaltar que o valor da PMD para as simulações e para os dados medidos são equivalentes a $\sim 2\ ps$.

Para o gráfico apresentado na Figura 4.16 (a), por exemplo, cada ponto

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

gerado no gráfico 4.2 corresponde a 1,7 horas. Para o gráfico apresentado na Figura 4.16 (b), cada ponto equivale a 0,22 horas.

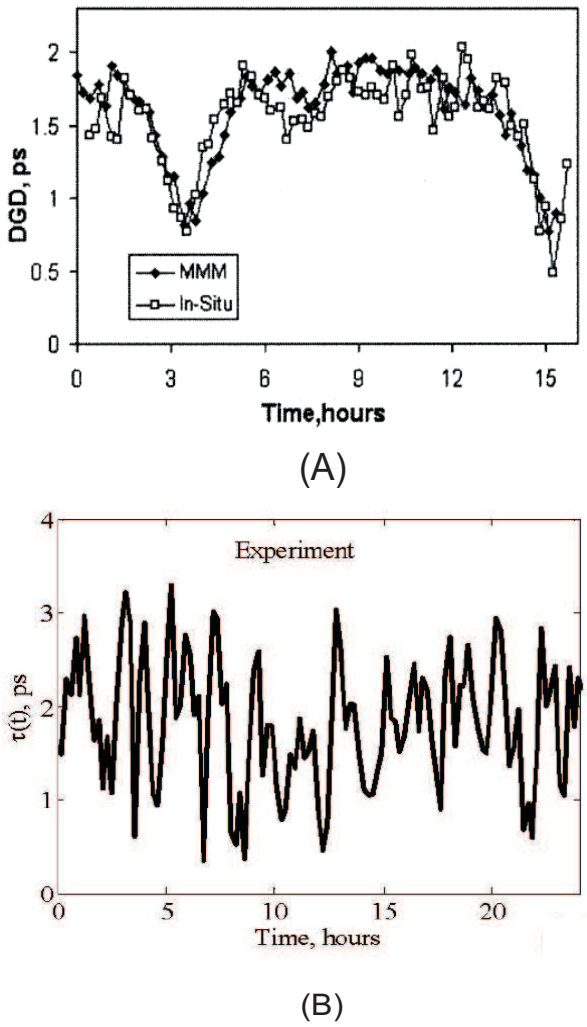

Figura 4.16: Medidas de PMD em função do tempo. Gráficos retirados das seguintes referências: (a) referência [35] e (b) referência [59].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

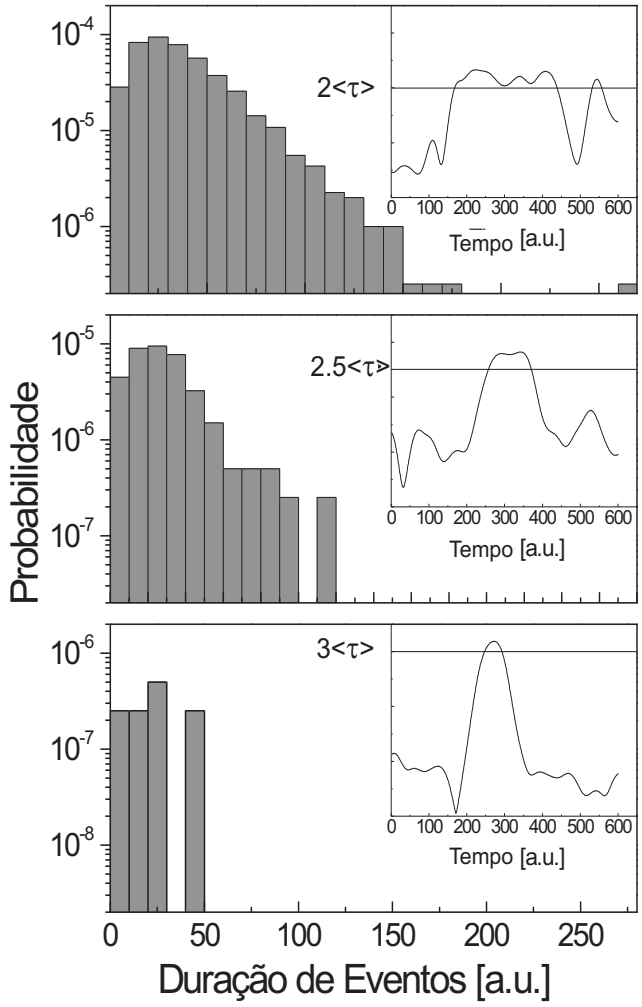

Figura 4.17: Distribuição de Probabilidade de eventos de falha para diferentes níveis de DGD. O detalhe mostra a evolução temporal do pior evento para cada um dos valores de DGD médio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

4.3 Controle de Polarização

Um controle preciso do comportamento da polarização é bastante importante para se obter uma performance "ótima" de componentes e sistemas ópticos. Algumas características destes sistemas (perdas de inserção, perdas, ganhos e dispersão dependentes da polarização) são bastante dependentes da polarização e devem ser cuidadosamente contabilizadas para o projeto e bom funcionamento desses sistemas ópticos.

Neste trabalho, foram realizados algumas simulações para o estudo do controle de polarização. São utilizados três canais, espaçados de 0,8 nm e a matriz de transmissão da fibra, onde trafegam esses três canais, foi gerada para uma PMD igual a 0,6 ps. O sistema a ser simulado é apresentado na equação abaixo:

$$S_{out} = Tw * S_{in} \tag{4-3}$$

onde S_{in} é o sinal de entrada, mantido fixo, S_{out} é o sinal de saída e Tw é a matriz de transferência da fibra.

A idéia é, então, aplicar ao sistema algum tipo de controle para que o S_{out} sofra o menor número possível de variações, ou seja, mantenha-se estável mesmo com as variações ocorridas na fibra ao longo do tempo.

Um recurso bem simples e direto é multiplicar a matriz Tw por alguma matriz que represente o controle a ser inserido.

A princípio, foi realizado o controle do canal 1 pelo próprio canal. O resultado do S_{out}, na esfera de Poincaré, é um ponto único, sem variações de ângulo, pois o controle é perfeito. Têm-se, neste caso, que $S_{out} = Tw^{-1} * Tw * S_{in}$ e portanto, o S_{out} é igual ao S_{in}.

Na Figura 4.18, é mostrado um resultado quando o canal 1 é controlado pelo seu canal adjacente, espaçado de 0,8 nm, conforme mostrado na equação abaixo. Neste caso, a diferença entre a matriz Tw do canal 1 e do canal 2 produzem as variações do S_{out} na esfera de Poincaré.

$$S_{out} = Tw_2^{-1} Tw_1 * S_{in} \tag{4-4}$$

O espaçamento entre canais foi variado e foi possível perceber uma melhora significativa no resultado encontrado. Quanto menor o espaçamento, melhor é o controle obtido, sinal do aumento da semelhança entre as matrizes Tw dos canais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

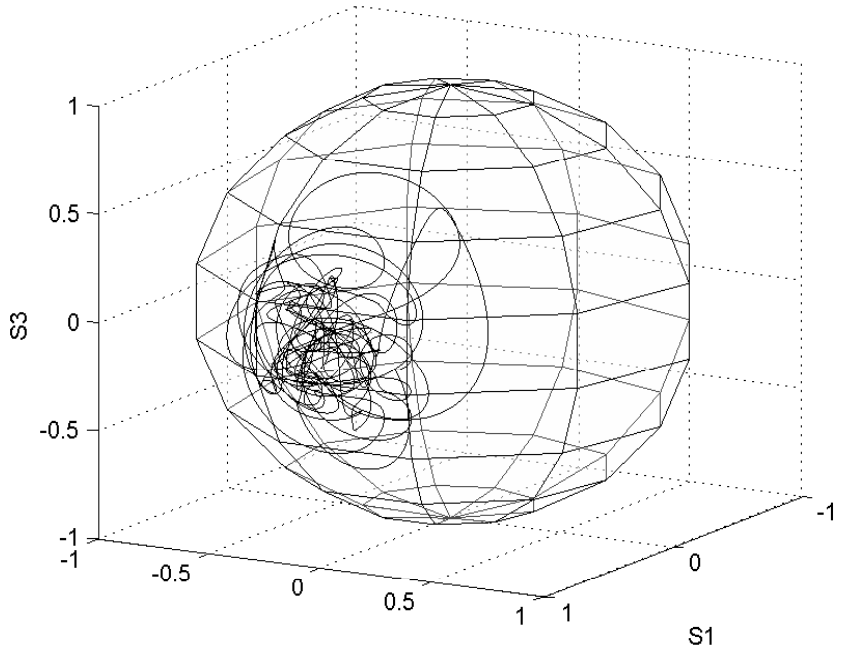

Figura 4.18: Evolução do SOP de saída do sistema, para um determinado canal sendo controlado pelo canal vizinho, espaçado de 0,8 nm.

Foi testado um tipo diferente de controle, onde a matriz Tw a ser multiplicada para realizar o controle é o resultado da média das matrizes adjacentes ao canal que se tenta controlar. Assim, a equação a ser simulada é modificada para:

$$S_{out} = (\frac{Tw_1 + Tw_3}{2})^{-1} * Tw_2 * S_{in} \tag{4-5}$$

Na Figura 4.19, é mostrado o resultado para este tipo de controle, estando os canais espaçados de 0,8 nm. O controle é melhor que o realizado anteriormente, equação 4.3, sinal de que a média das matrizes Tw adjacentes ao canal a ser controlado é mais semelhante à matriz Tw deste canal que a matriz Tw do canal vizinho a ele.

No caso da redução do espaçamento entre canais de 0,8 nm para 0,4 nm, o controle realizado pela média das matrizes Tw dos canais vizinhos se mostra mais eficiente, de acordo com o apresentado na Figura 4.20.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

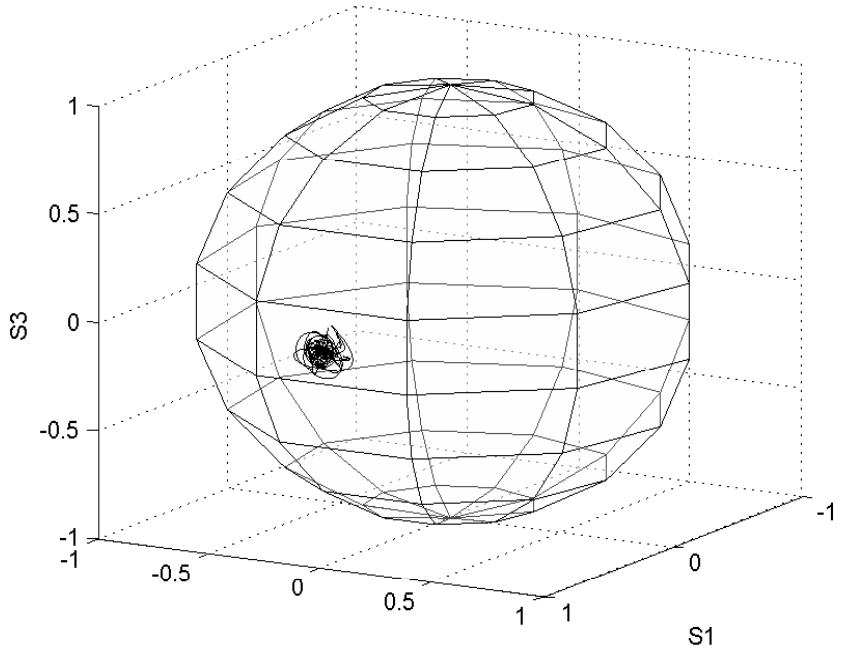

Figura 4.19: Evolução do SOP de saída do sistema, para um determinado canal sendo controlado pela média dos canais adjacentes. Cada um dos canais adjacentes é espaçados de 0,8 nm do canal central.

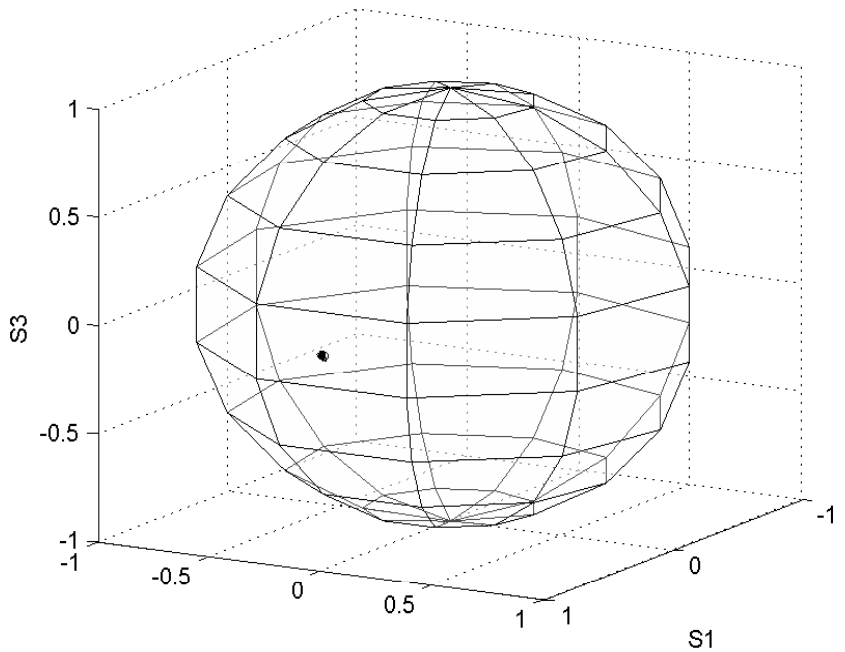

Figura 4.20: Evolução do SOP de saída do sistema, para um determinado canal sendo controlado pela média dos canais adjacentes. Cada um dos canais adjacentes é espaçados de 0,4 nm do canal central.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

4.4 Compensação de PMD

4.4.1 Mid-span

Com a técnica, chamada de *Mid-span* e explicada na seção 3.2.2, foram realizadas as simulações para um sistema de compensação de PMD.

Conforme explicado, os dados de saída do programa de otimização são valores de potência de RF, e o primeiro teste realizado foi o cálculo do tempo que o sistema permanece, com o valor do RF de saída, abaixo de um determinado limiar, prejudicando assim a transmissão de informações. Em sistemas de transmissão, o DGD do enlace, assim como o PSP, flutua aleatoriamente ao longo do tempo. Para evitar excessivas rajadas de erros, que gerem distorções no sinal, os sistemas são projetados com uma margem de erro (OSNR) típica de 1 ou 2 dB. Uma falha ocorre quando a penalidade excede essa margem alocada [52]. A penalidade que será considerada neste trabalho é de 2 dB.

A Figura 4.21 exemplifica como é feito o cálculo do tempo que o sistema permanece abaixo do limiar. A cada vez que o nível do RF passa abaixo do limiar, é iniciada a contagem do tempo, e assim que ele retorna para um valor acima do nível determinado, a contagem pára. Assim, ao final desta análise, é conhecido quantas vezes o sinal caiu abaixo do limiar e por quanto tempo ele permaneceu nesta situação em cada um dos eventos.

A configuração do sistema de transmissão foi mostrada na Figura 3.2, na seção 3.2.2. A esta configuração foi acrescentado um misturador de polarização na entrada do sistema, conforme mostrado na Figura 4.22. Abaixo, na Figura 4.23, são mostrados os resultados para as duas situações, com e sem a presença de um misturador de polarização na entrada do sistema de transmissão. Nesta figura são mostradas simulações de transmissão de apenas um canal. É visível a melhora dos resultados quando o misturador de polarização é utilizado. Quando a polarização do sinal de entrada (S_{in}) é mantida fixa, a potência de RF, na saída, passa abaixo do limiar pré-determinado e fica nesta situação por um longo tempo (65 u.t. - unidade de tempo), enquanto que para o sinal de entrada que sofre variações, o maior tempo que o RF permanece abaixo do mesmo limiar é de 6 u.t.. Ou seja, o tempo de falha a que o sistema estará sujeito é bem menor, permitindo a associação de outras técnicas, como o FEC, por exemplo. Portanto, para a simulação seguinte, que visa compensação de PMD, foi utilizado este re-

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

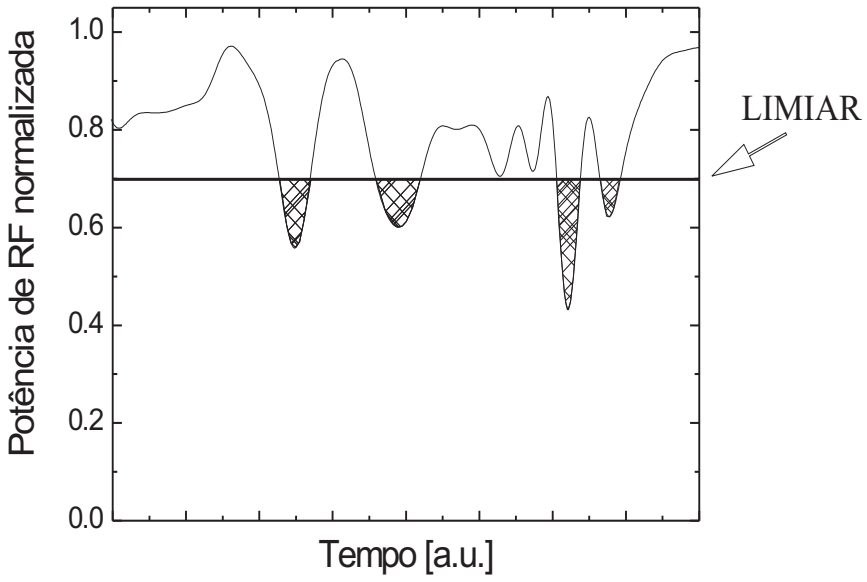

Figura 4.21: Exemplificação do cálculo de tempo que o sinal de RF fica abaixo de um determinado limiar.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

curso da variação da polarização antes do sistema, na tentativa de obtenção de melhores resultados.

Assim, além do uso do controlador de polarização posicionado no meio do enlace, decidiu-se também utilizar um misturador de polarização no início do mesmo.

Na simulação seguinte, foram lançados simultaneamente, no sistema, 20 canais vizinhos, espaçados de 0,8 nm. A PMD do sistema, conforme citado anteriormente, é de $\sim$ 3,2 ps. Na Figura 4.24, é plotada a função de probabilidade cumulativa (CPF) da penalidade, em dB, gerada pelo desvanecimento do sinal à saída do sistema. Os dados obtidos, podem ser comparados aos resultados publicados em [48]. Conforme explicado na seção 3.2.2, a compensação do sinal se deu a partir da otimização do pior canal. A compensação é bastante satisfatória e mesmo para 20 canais, a penalidade encontrada tem um valor pequeno.

Vale salientar que para obtenção dos resultados finais, foi considerado que todos os canais trafegavam pela fibra ao mesmo tempo e, portanto, os valores cumulativos foram somados.

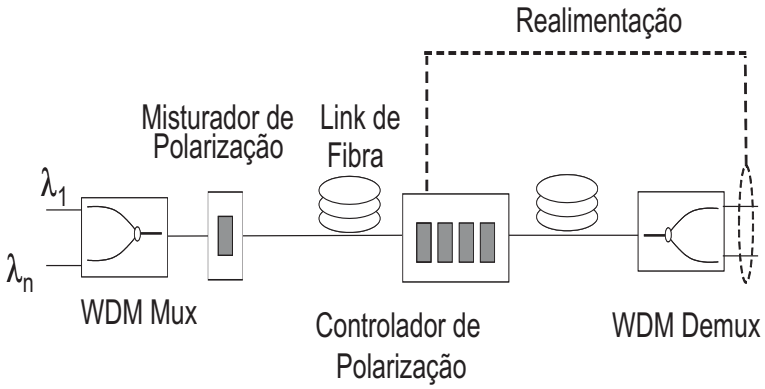

Figura 4.22: Esquema para utilização da técnica *Mid-span* com misturador de polarização na entrada da fibra.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

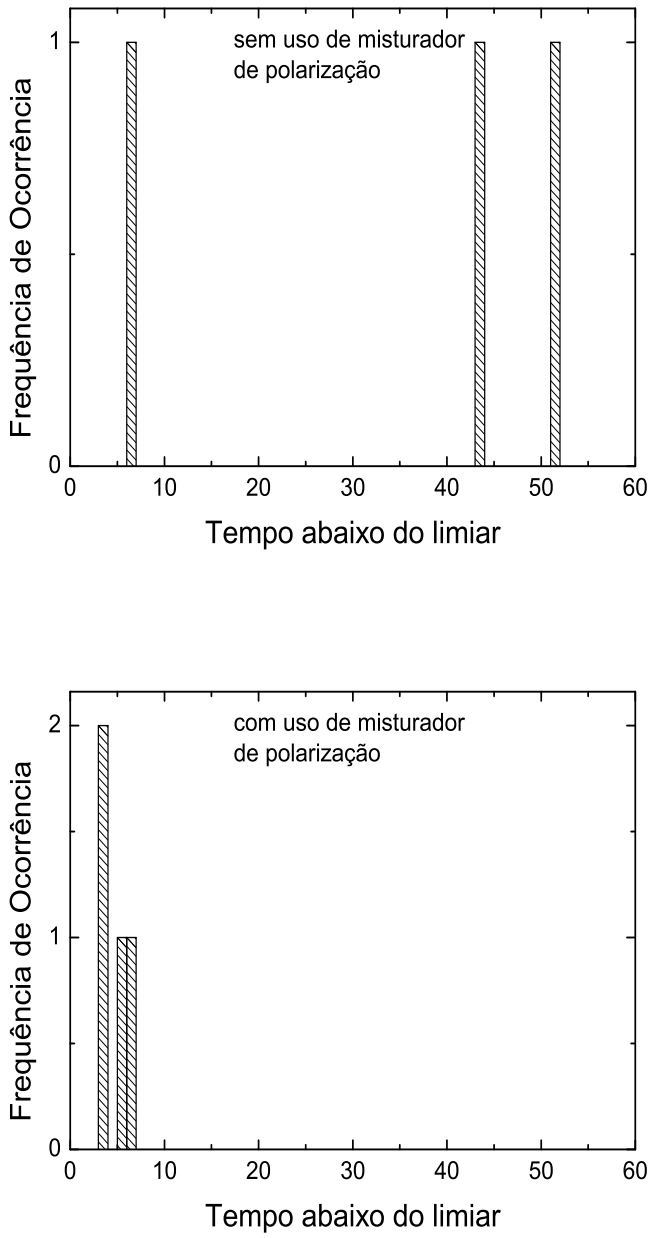

Figura 4.23: Tempo de permanência abaixo de um determinado limiar da potência de RF do sinal de saída do sistema.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

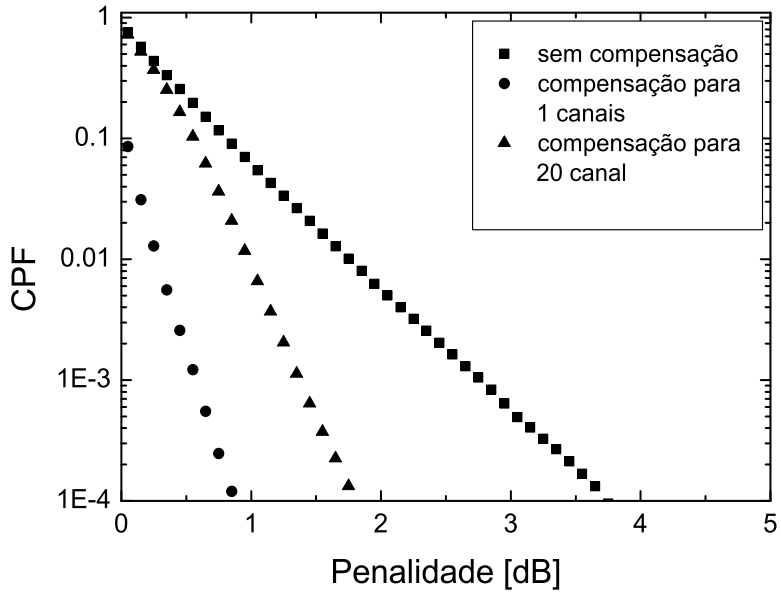

Figura 4.24: Função de probabilidade cumulativa para um sistema WDM de 20 canais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

4.4.2 Utilização de Misturadores de Polarização com FEC e Controladores de Polarização

Nesta etapa, conforme mostrado na Figura 3.7 da seção 3.2.2, foi simulado um sistema que utiliza misturadores de polarização, FEC e um controlador de polarização, juntamente com uma linha de atraso para tentar compensar a PMD do sistema.

A solução proposta para este compensador é adicionar uma linha de atraso a um sistema de transmissão que utilize misturadores de polarização, e usar ambos, para realizar a otimização do sinal. Além disso, ainda utilizar o FEC para trabalhar nos efeitos remanescentes.

Nas simulações, a otimização se dá em torno da média do RF produzido pelo misturador de polarização. O controlador de polarização possui duas lâminas que são realimentadas pelo maior "sinal médio" de RF. Assim, tenta-se ajustar o sistema para maximizar a potência de RF, enquanto se minimiza as flutuações pico-a-pico desse sinal.

A Figura 4.25, mostra o resultado encontrado. Os dados de saída do simulador são de sinal de potência de RF e foram manipulados para fornecer o resultado na forma apresentada. Foi escolhido um limitador, que indica qual o "tempo" máximo que o RF pode permanecer abaixo de um determinado limiar. A maneira que foi utilizada para contar o tempo que o sistema fica abaixo de um limiar está mostrada na Figura 4.21. De posse desse limitador, o valor do limiar é variado (decrescido) e a contagem de "tempo" dos vetores abaixo desse limiar é repetida, até que não exista nenhum vetor de tamanho maior que o "limitador". Esse limiar encontrado será o valor acima do qual haverá erros maiores do que o FEC pode corrigir. A partir deste valor é calculada qual penalidade é inserida no sistema, dependente do valor do DGD médio. Neste trabalho, o tamanho desse limitador foi calibrado a partir da frequência do misturador de polarização e da frequência de transmissão. Conforme explicado na Seção 3.2.2, os misturadores de polarização são compostos de três lâminas que atuam com frequências ligeiramente diferentes. Foi considerado que a atuação do misturador mais lento corresponde a 200 KHz e que a transmissão do sistema acontece a 10 Gb/s. Com estes dois valores encontrou-se o tamanho do limitador que foi de 5 "passos temporais", correspondente ao tamanho da palavra do código corretor utilizado.

Considerando-se que o FEC provê uma margem de relação sinal-ruído de $\sim$ 6,5 dB [36] e, computando este valor ao resultado final, é encontrado o resultado apresentado em 4.25. Nesta figura estão mostrados

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

também resultados publicados em [36]. Nesta referência são utilizados misturadores de polarização e FEC. A princípio, foram rodadas simulações visando compensação de PMD utilizando somente estes dois elementos, sem a presença dos controladores de polarização. É excelente a concordância entre os dados simulados e os dados retirados da referência [36]. Com a inserção dos controladores de polarização a performance do sistema, em presença de PMD, é melhorada. Esta contribuição é de grande valia para o aprimoramento do sistema de compensação final.

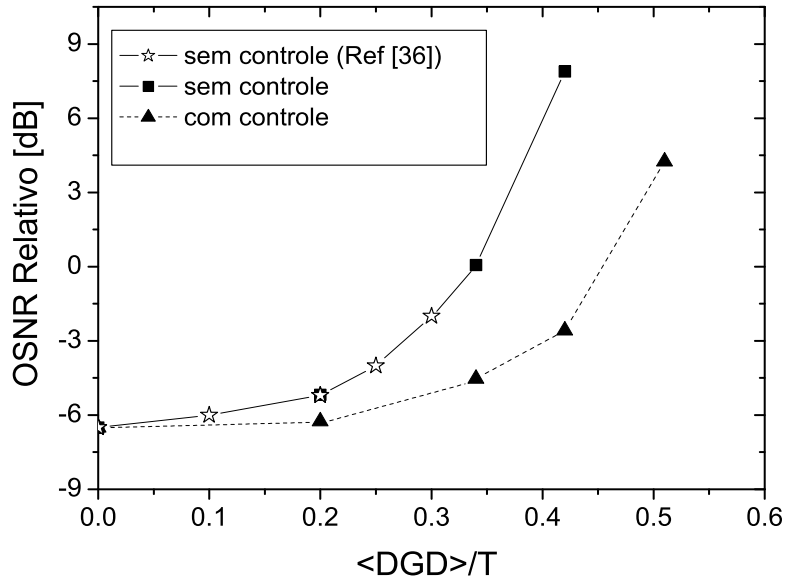

Figura 4.25: Relação sinal-ruído relativo, para um sistema com e sem controle, em função da PMD. A comparação é realizada com dados apresentados na referência [36].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

4.5
Comparação entre Medidas Experimentais e Dados Simulados

4.5.1
Medidas de RF

Para as medidas de RF, a montagem é mostrada na Figura 4.26. Foram utilizados quatro comprimentos de onda espaçados de 0,8 nm (1545,32 nm, 1546,12 nm 1546,92 nm e 1547,72 nm). O comprimento de onda igual a 1547,72 nm foi mantido como referência (λ_1), enquanto (λ_2) foi variado entre os outros três comprimentos de onda restantes. Os dois controladores de polarização permitiram que cada um dos λ´s fosse ajustado no seu valor máximo sem a interferência do outro. Sobre o emulador de PMD também foram colocadas lâmpadas que acendiam e apagavam de forma aleatória a fim de acelerar as representações das variações ambientais. Foi analisada a correlação entre os sinais de RF, detectados após a demultiplexação dos dois comprimentos de onda. A frequência escolhida foi de 7 GHz, compatível com a banda passante dos detectores e amplificadores de RF. Esta frequência corresponde à região mais atingida do espectro no caso de uma transmissão em 10 Gb/s. Os fotodetectores são seguidos de amplificadores de baixo ruído e diodos detectores de RF.

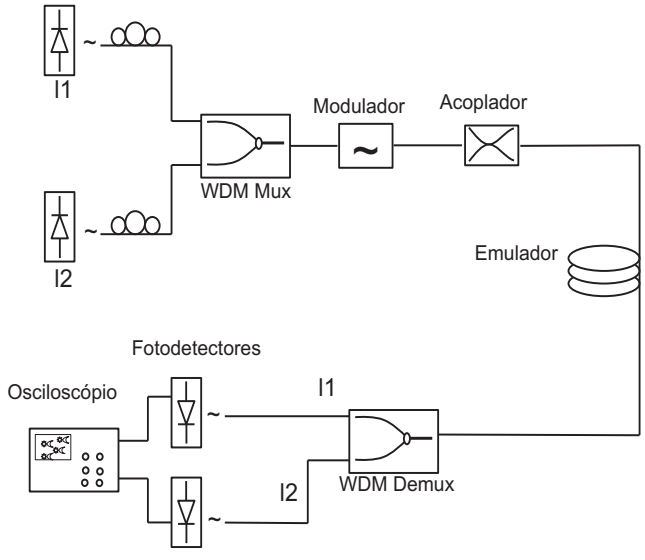

Figura 4.26: Esquema de montagem experimental para medidas de correlação de RF.

Abaixo, na Figura 4.27, são mostrados os sinais de RF medidos para

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

dois canais. Neste exemplo, os comprimentos de onda dos canais são 1545,35 nm e 1547,72 nm, e o índice temporal, correspondente à amostragem, converte-se em tempo pelo intervalo entre as amostras, no caso 100 ms. Assim, esta figura corresponde a uma aquisição total de 200 segundos. As correlações e análises foram feitas com um tempo total de medidas em torno de duas horas.

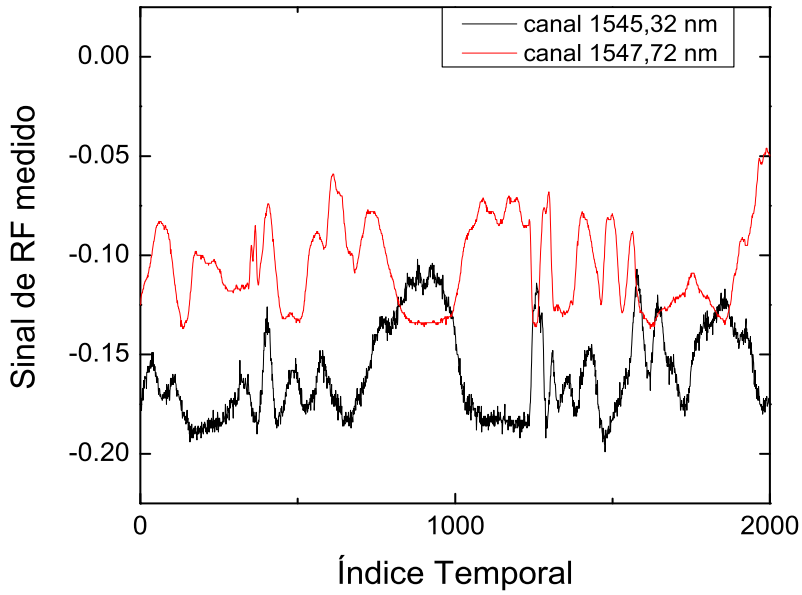

Figura 4.27: Sinal de RF medido para dois canais vizinhos: 1545,35 nm e 1547,72 nm.

A Figura 4.28 mostra a estatística da potência do sinal de RF recebido para dados medidos e simulados. A concordância entre dados medidos e simulados se mostra excelente. É possível perceber que a potência medida apresenta uma pequena variação no lado direito do gráfico, que difere das simulações. Essa diferença aparece a partir de flutuações não originadas pelo DGD, mas sim por outros fenômenos relacionados a polarização. Nesse caso específico, a PDL existente no emulador, de ~ 1 dB, é grande o suficiente para explicar essa variação [47].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

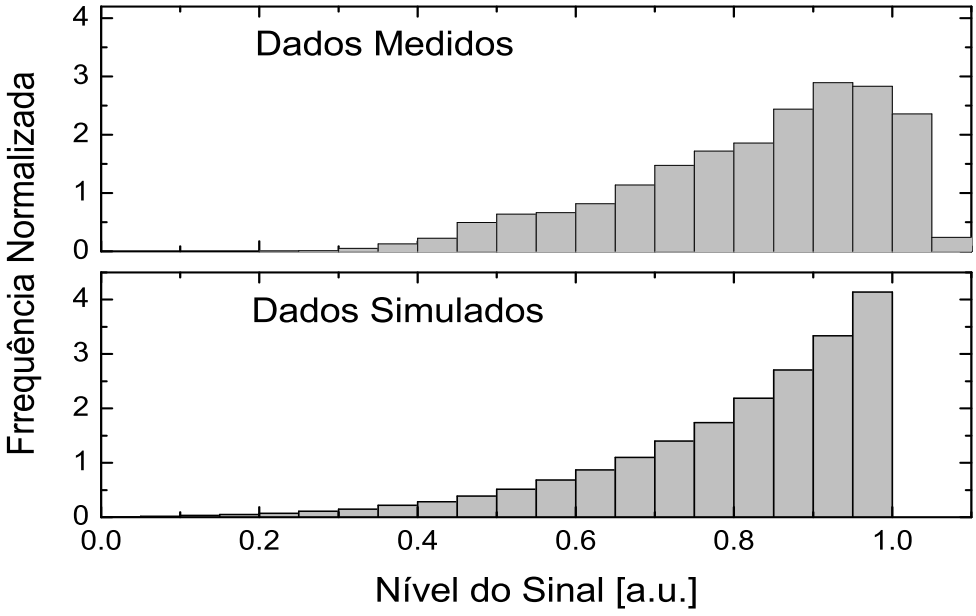

Figura 4.28: Estatística do sinal RF medido e simulado para um sinal modulado em 7 GHz num sistema com um emulador de PMD de 32 ps.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

4.5.2
Medidas de controle de polarização

A segunda medida apresentada, é de grau de polarização (DOP - *Degree of Polarization*). Este é um parâmetro que representa a quantidade relativa de luz polarizada e não polarizada em uma onda luminosa, e é definido como a razão entre a intensidade de luz polarizada e a intensidade total de luz [60].

Foi simulado um controle da polarização para um sistema com múltiplos canais e que observa o comportamento da polarização dos canais, em relação a correlação, quando são utilizados alguns canais no sistema, conforme explicado na Seção 4.3.

Na simulação, o canal 2 é controlado a partir do canal 1, e o SOP é armazenado. O sinal de entrada é mantido fixo, e o controle é feito pela matriz de Jones do canal fixo. Logo, o melhor resultado será quando o canal 1 estiver sendo controlado por ele mesmo e, quanto maior o espaçamento entre o canal 1 e o canal 2, pior será o controle. Isto porque a correlação entre canais diminui com o aumento do espaçamento entre eles.

A montagem experimental está mostrada na Figura 4.29. Existem dois *lasers*, trabalhando com frequências diferentes dentro da grade de frequências do ITU (0,8 nm), que são combinados num multiplexador e lançados numa fibra ou emulador. Após cada um dos *lasers*, existe um controlador de polarização que é utilizado para ajustar o SOP de entrada de cada um dos canais λ_1 e λ_2, garantindo que os dois comprimentos de onda entram na fibra com o mesmo estado de polarização. Para o menor valor de PMD, 0,6 ps, foi utilizado 33 km de fibra DS. A medida de PMD igual a 3,5 ps utilizou um emulador com 20 seções de fibra HiBi. O emulador foi colocado dentro de uma caixa com lâmpadas acendendo e apagando para forçar a birrefringência a variar mais rapidamente durante os experimentos, a fim de acelerar as representações das variações ambientais. Para calcular a correlação entre os SOP´s, o sinal óptico passa através de um controlador de polarização, que consiste em quatro lâminas controladoras de polarização. O sinal é então demultiplexado e um dos canais é observado por um polarímetro, enquanto o outro é utilizado com realimentação para o controlador de polarização de quatro lâminas, que tem a função de manter a polarização do canal estável, apesar das variações adicionadas pelas flutuações do sistema ao longo do tempo. Com essa técnica, o canal de controle (λ_1) é mantido fixo e as variações do SOP do outros canal (λ_2) é observada no polarímetro. Neste experimento, o passo de variação da separação entre canais é de 0,8 nm.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

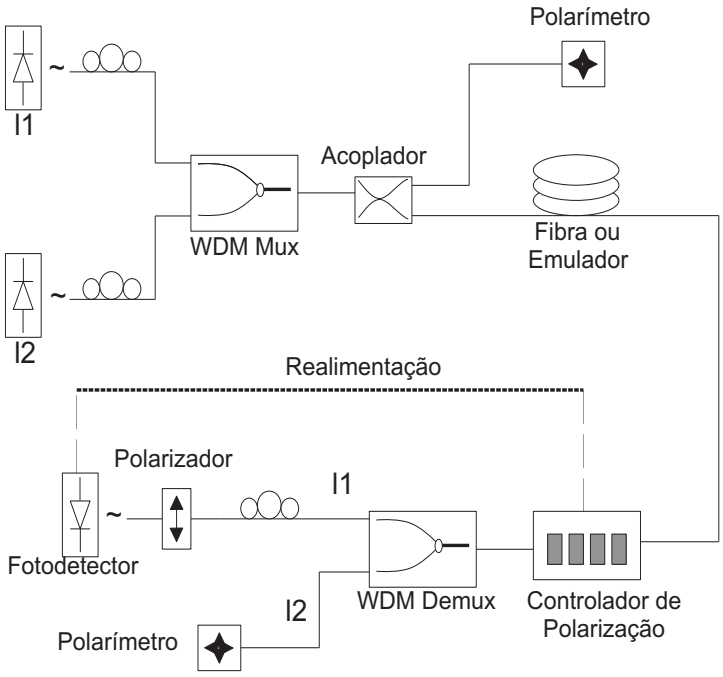

Figura 4.29: Esquema de montagem experimental para medidas de correlação de SOP.

Quando o SOP do canal de controle é mantido fixo, o SOP dos canais vizinhos irá variar porque a Matriz de Jones não é a mesma para todos os comprimentos de onda, o que origina variações de DGD e PSP. Então, nesta medida, o SOP do canal vizinho (λ_2) ao canal fixo (λ_1) é gravado, e a correlação entre estes dois canais é medida, através da determinação do valor médio do SOP, que é equivalente ao DOP.

A Figura 4.30 ilustra a medida da evolução do SOP do canal controlado (λ_2) na esfera de Poincaré, com e sem a utilização de controle de polarização. Nesta figura, o espaçamento entre o canal de referência e o canal controlado, é de 0,4 nm. É perceptível que sem controle de polarização, o λ_2 se movimenta pela esfera livremente, enquanto que apenas uma pequena região da esfera é coberta quando o controle é ativado.

A Figura 4.31 mostra dados de DOP medidos e simulados em função do espaçamento do comprimento de onda para diferentes valores de PMD. O ajuste entre estes dados é bastante razoável e corrobora para a validação do simulador. Na Figura 4.32, é mostrada a evolução do SOP de um canal,λ_2, espaçado de 2,4 nm do canal de controle, que é mantido fixo, para um emulador com PMD igual a 3,5 ps. A descorrelação entre os canais é visível, já que o SOP do canal em questão, cobre toda a esfera de Poincaré [47].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

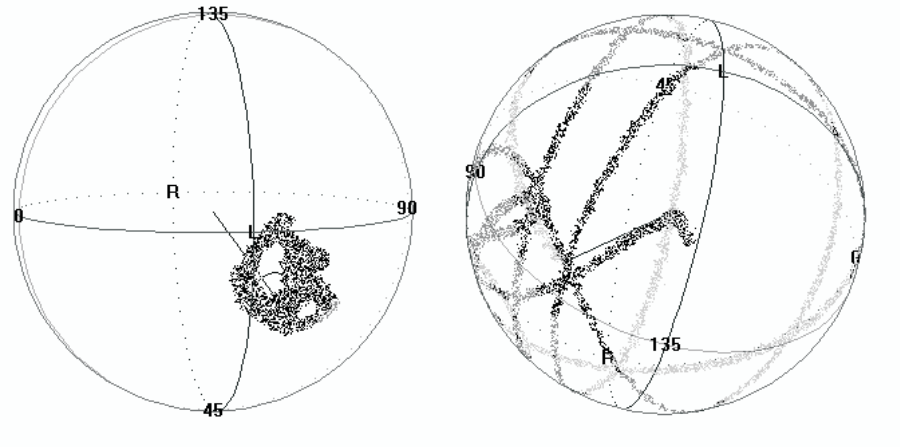

Figura 4.30: Evolução na esfera de Poincaré, do SOP do λ_1, durante 20 minutos, com (esquerda) e sem (direita) controle de polarização do canal vizinho, λ_2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

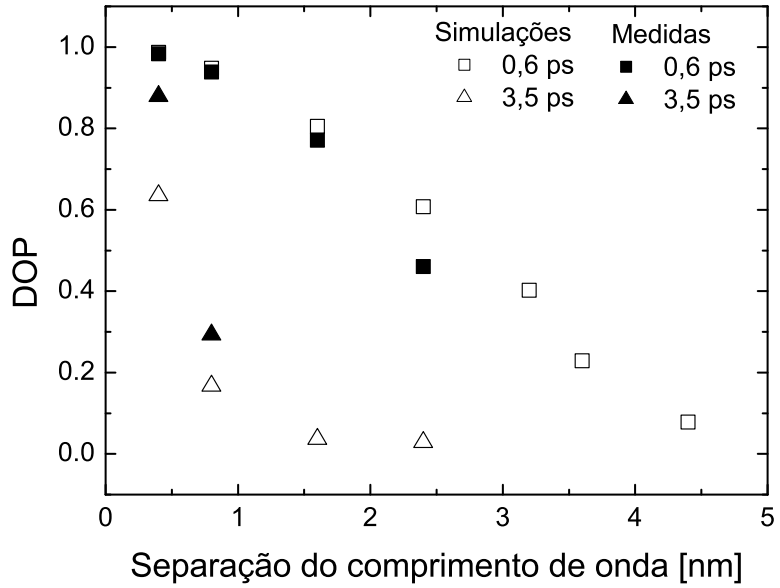

Figura 4.31: DOP medido (símbolos em preto) e simulado (símbolos em branco) em função da separação do comprimento de onda.

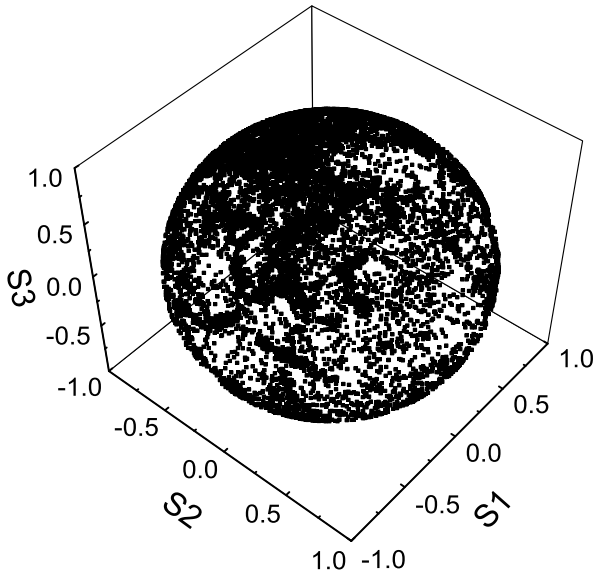

Figura 4.32: Medidas da evolução do SOP para um canal controlado, separado de 2,4 *nm* do canal mantido fixo (canal de referência) e num sistema com PMD igual a 3,5 *ps*.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

Ainda testando controle de polarização, foram realizados alguns testes. Neste caso, o controle é feito com dois controladores de polarização compostos de quatro e duas lâminas birrefringentes, respectivamente. São utilizados três comprimentos de onda, sendo o canal central, λ_2, o canal que será observado, enquanto os outros dois canais serão controlados. Para λ_1 é utilizado o controlador com quatro lâminas e para λ_3 o outro controlador, com duas lâminas. A idéia é que o controle seja realizado nos canais adjacentes visando um bom desempenho do canal central. Primeiro realiza-se o controle do canal 1, até que este atinja a situação ótima, então, inicia-se o controle do canal 3 e, quando este também atingir a situação ótima, é observado o estado do canal 2.

A Figura 4.33 mostra o esquema de montagem experimental que foi realizado. São lançados três comprimentos de onda em um multiplexador: λ_1, numa determinada polarização, λ_2 na mesma polarização e λ_3 na polarização 45^o em referência a λ_1. O sinal passa então pela fibra óptica e pelos controladores de polarização de λ_1 e λ_3, que estão conectados ao detector do sinal, no fim do sistema por um canal de realimentação. Após a demultiplexação do sinal, a intensidade do sinal do canal 1 é detectada e o resultado obtido é utilizado para realimentar o controlador de quatro lâminas. O mesmo acontece com o λ_3, que é detectado e utilizado para realimentar o controlador de duas lâminas. Após o sistema ajustado, o λ_2 é observado no polarímetro.

As simulações seguiram um esquema semelhante ao utilizado para as as medidas. A diferença consiste no fato da simulação reduzir o controlador de polarização de duas lâminas a apenas uma lâmina posicionada a 0^o. Esta adaptação pode ser realizada devido ao fato de que nas medidas, as duas lâminas foram utilizadas para garantir a liberdade de reinicialização de uma delas, caso a outra chegasse a um limite extremo de variação. Foi utilizada uma fibra com 0,55 ps de PMD e espaçamento entre canais de 0,8 nm. As lâminas foram posicionadas na seguinte sequência, 0^o, 45^o, 0^o, 45^o, para o primeiro controlador e 0^o para o segundo. São lançados, simultaneamente, três canais, que passam por um multiplexador e, depois, pela fibra óptica. Após a fibra, estão posicionados dois controladores de polarização, o primeiro para o canal 1 e o segundo para o canal 3. Após os controladores, o sinal é demultiplexado e então o canal 2 é observado enquanto os outros dois canais são utilizados para realimentação dos controladores. O controle tenta manter a estabilidade do canal 2, mesmo em face das variações do ambiente e consequente variações no DGD da fibra.

Na Figura 4.34 é mostrado o resultado das simulações para um sistema

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

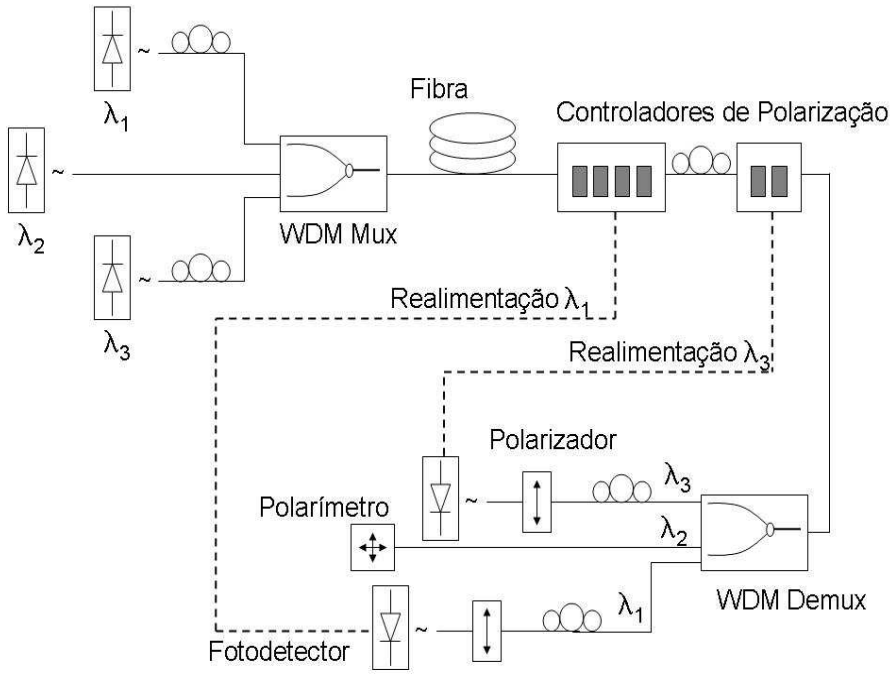

Figura 4.33: Esquema de montagem experimental para um sistema de controle de polarização com três canais, onde o canal central (λ_2) é mantido estável a partir da atuação do controle nos canais adjacentes (λ_1 e λ_3).

com e sem atuação do controle. Na falta de controle, a polarização do sinal de saída (S_{out}) varia bastante, cobrindo toda a esfera de Poincaré. Entretanto, quando o controle é ativado, a variação do S_{out} diminui sensivelmente. Se o espaçamento entre canais for dimunuído para 0,4 nm, os resultados se tornam ainda mais satisfatórios.

A Tabela 4.2, mostra uma comparação entre dados medidos e simulados. De posse dos dados de polarização de saída do sistema, foi calculada a penalidade de potência que esta variação do S_{out} implica. Na tabela abaixo está mostrado o valor médio da penalidade, o valor máximo e o desvio padrão em torno da média. Os resultados, são bastante próximos, demosntrando a eficência do software de controle.

	Medidas	Simulações
Média	0,010	0,016
Valor máximo	0,102	0,098
Desvio Padrão	0,010	0,043

Tabela 4.2: Comparação entre medidas e simulações, para a penalidade de potência inserida pela variação da polarização do sinal de saída S_{out}.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

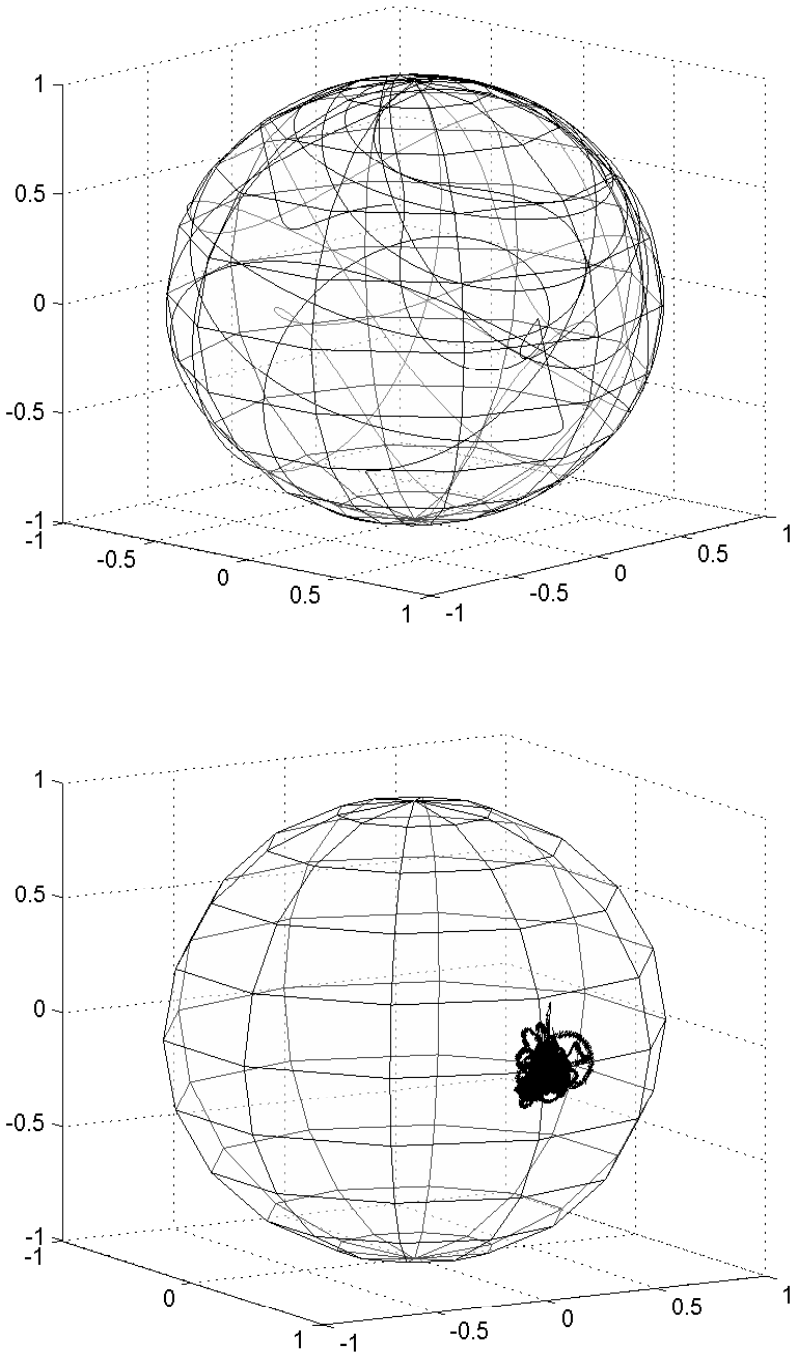

Figura 4.34: SOP_{out} mostrado na esfera de Poincaré para um sistema sem compensação (acima) e com compensação atuando.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

4.5.3
Medida de compensação de PMD

Um último teste, comparando medidas e simulações, foi realizado. O objetivo é a pré-compensação de PMD de 1^a ordem, através do método de transmissão no PSP.

A Figura 4.35 apresenta o esquema experimental para as medidas. São utilizados dois canais espaçados de 0,8 nm, λ_1 e λ_2, que são combinados em um multiplexador e o sinal resultante é modulado a 10 Gb/s em NRZ 231-1 PRBS. A polarização do *laser* é otimizada por um controlador de polarização manual. O sinal modulado passa por um controlador de polarização e por um emulador de 20 seções com PMD igual a 32 ps. Um EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) com controle de ganho automático (*Automatic Gain Control - AGC*) é utilizado para eliminar flutuações de potência decorrentes de PDL acumulada ao longo do enlace de transmissão. Após o EDFA, parte do sinal é detectado e utilizado como realimentação para o esquema de compensação para lançamento no PSP. O restante do sinal óptico é demultiplexado e detectado. O sinal de realimentação, que é direcionado ao controlador de polarização, possui a potência de RF total do sistema. Foram aquisitadas medidas de BER (*Bit Error Ratio*), com 10 s cada uma [30].

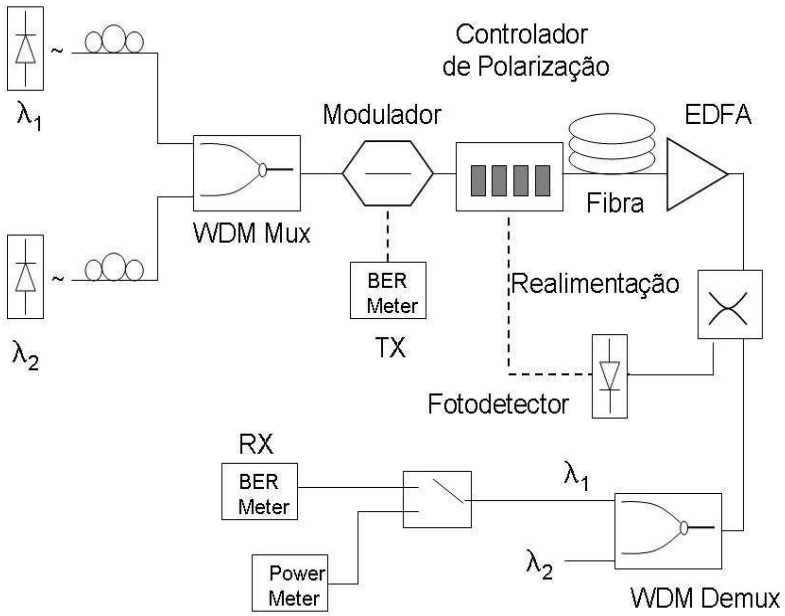

Figura 4.35: Esquema de montagem experimental para medidas de compensação de PMD.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

Tanto as simulações quanto a medida experimental, utilizaram o nível detectado do sinal de RF sinal de realimentação para o controlador de polarização.

A Figura 4.36 apresenta os resultados para medidas experimentais e simulações. São mostrados gráficos de probabilidade de falha, considerando-se como referência uma $BER = 10^{-9}$. A concordância entre resultados simulados e medidos é bastante satisfatória.

As simulações consideraram somente o desvanecimento relativo à PMD, negligenciando possíveis outras fontes do ruído. Isto explica a diferença entre as curvas, para valores de penalidade próximos do zero, onde a simulação possui uma inclinação abrupta, já que não contabiliza a penalidade incluída por elementos do sistema, enquanto a curva para as medidas possui uma inclinação mais suave. Também deve ser citado que a equação utilizada para o cálculo da penalidade, equação 2.1.2, é dependente de características do pulso enviado e também do receptor, explicando assim pequenas variações entre os resultados.

Os resultados, tanto experimental quanto simulado, indicam uma melhora significativa no nível das penalidade de potência impostas pelo sistema quando o sinal de potência é usado como realimentação para compensação de PMD num sistema de transmissão no PSP, para dois canais. Para um grande número de canais, entretanto, a potência de RF perde a sensibilidade como sinal de realimentação, possivelmente por apresentar uma tendência de se tornar um valor médio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA

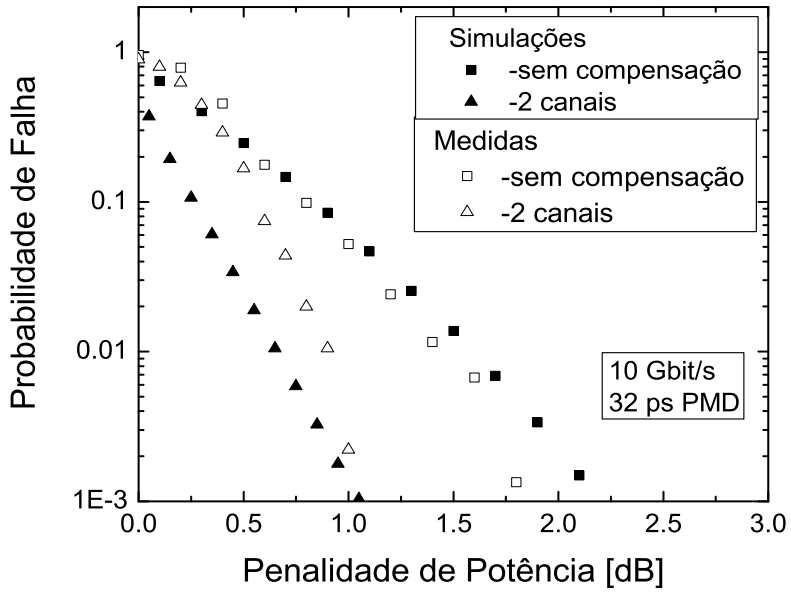

Figura 4.36: Resultados simulados e medidos de probabilidade de falha para um sistema de compensação de PMD por transmissão no PSP.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310506/CA