

6 O Compensador de PMD

Na última década vários progressos têm sido alcançados nos sistemas de comunicação óptica de longa distância. A dispersão dos modos de polarização PMD é um dos maiores problemas em sistemas que operam a taxas de 10 *Gb/s* e 40 *Gb/s*. A PMD, como discutido no capítulo 2, geralmente resulta da variação aleatória da birrefringência ao longo da fibra, degenerando os modos ortogonalmente polarizados.

Não há como garantir uma penalidade máxima devido a PMD em sistemas de transmissão: qualquer penalidade pode ser escolhida como limite superior, pois sempre há uma chance, chamada de probabilidade de falha, deste limite ser superado.

A matriz de transmissão de um sistema com PMD, onde um pulso é propagado com velocidades de grupo diferentes, pode ser definida como de primeira ordem quando a largura de faixa do espectro de sinal é pequena se comparada à dependência do PSP e do DGD com a frequência óptica [51].

O valor da PMD para uma fibra é o valor médio no tempo (ou na frequência) do DGD. É usualmente considerado que o valor máximo tolerável de PMD está entre 10 a no máximo 20 % do *bit slot* [52]. Outros fatores que tornam a PMD muito importante estão associados à variação temporal do DGD, que flutua de acordo com as variações de temperatura, tensão e manuseio nos bastidores ópticos, entre outros fatores [16, 24].

Estas variações aleatórias tornam os sistemas de compensação de PMD uma importante solução, sendo através deles reduzida a probabilidade de falhas na operação.

Neste capítulo será apresentado o compensador de PMD de 1ª ordem, desenvolvido a partir do seguidor de polarização discutido no capítulo 4, avaliando sua performance com diferentes esquemas de compensação. Serão apresentados os resultados das medidas realizadas, utilizando a pós-compensação de 1ª ordem com linha de atraso fixa e variável e a pré-compensação pelo método

do PSP. Os resultados experimentais obtidos com os diferentes esquemas de compensação demonstram que a performance do protótipo desenvolvido é similar à obtida com sistemas comerciais.

6.1. O Compensador de PMD Desenvolvido

O compensador desenvolvido é formado por um controlador de polarização, uma linha de atraso variável e uma unidade de controle para ajustar o controlador de polarização e a linha de atraso. A unidade de controle gera diferentes sinais para cada atuador permitindo que cada atuador possua seu próprio sinal de realimentação, o que reduz, significativamente, o tempo de resposta do compensador. Isto garante um ajuste rápido do compensador quando as condições de DGD na fibra se alteram.

Este compensador reduz o tempo de resposta dos atuadores e a complexidade do algoritmo de controle, se comparado aos algoritmos usados nos compensadores de PMD que empregam filtragem espectral [21, 22] como sinal de realimentação.

Um detector óptico é utilizado para converter o sinal óptico em elétrico para este entrar no Sistema de Aquisição de Dados & Controle a fim de processar o sinal elétrico e ajustar os atuadores. O algoritmo de controle utilizado no sistema de Aquisição de Dados & Controle é o mesmo desenvolvido no seguidor de polarização, discutido no capítulo 5.

6.1.1. Montagem experimental

Dois métodos de compensação de 1ª ordem foram utilizados nas montagens experimentais realizadas, a pós-compensação de 1ª ordem e a pré-compensação pelo método de transmissão no PSP.

Três esquemas de compensação foram testados, dois na pós-compensação, utilizando linha de atraso fixa e variável e um na pré-compensação, transmitindo o sinal óptico de entrada no PSP.

6.1.1.1. Abordagens Empregadas nas Medidas de BER

Duas abordagens foram empregadas nas medidas de BER realizadas, uma considerando flutuações térmicas rápidas e outra considerando flutuações térmicas lentas no emulador.

A estatística das flutuações de BER, usando os métodos de pós e pré-compensação sob flutuações rápidas das condições do emulador, foram avaliadas em sucessivas medidas de BER. O tempo de cada medida de BER foi de 10 s, sendo repetidamente executadas, sem interrupções, por períodos de mais de 30 horas, somando um número total de mais de 7000 medidas de BER para cada esquema estudado.

Da mesma forma, medidas sucessivas de BER, com duração de 10 s foram realizadas para um dos esquemas de pós-compensação, estabilizando-se termicamente o emulador, fazendo com que as flutuações térmicas se tornassem lentas. Isto permitiria comparar os resultados das duas abordagens e validar os resultados obtidos com as medidas sob flutuação rápida. Uma vez que nas condições de flutuação lenta do emulador, o compensador poderia ter uma dificuldade adicional para sair de máximos locais. O tempo total de medida de BER, para a situação de flutuação térmica lenta, foi aumentado em 10 vezes, contabilizando um período de 300 horas de medida, acumulando mais de 70000 medidas de BER.

6.1.1.2. Pós-Compensação de 1ª Ordem

O sistema de medida consiste basicamente em um analisador SDH Sonet de 10 Gb/s, um emulador de PMD e um compensador de 1ª ordem. O compensador de PMD consiste em um controlador de polarização, uma linha de atraso variável e um Sistema de Aquisição de Dados & Controle. A linha de atraso utilizada nos experimentos de pós-compensação é a linha proposta no capítulo 3, item 3.4, uma fibra HiBi pressionada no meio por um elemento piezo-elétrico. Esta linha gera atrasos de 0-90 ps, como foi mostrado na figura 23, com um tempo de resposta maior que 60 kHz. Esta linha de atraso variável foi também utilizada como linha de atraso fixo programável para testes de determinação de qual a melhor escolha

de valor de atraso para a linha quando esta possui valor fixo. O tempo médio de alinhamento do compensador (*apontador*) da condição desligado/ligado em relação ao estado de polarização aleatória de entrada foi de 14 *ms*.

Na figura 59 é apresentada a montagem experimental. Um emulador de PMD com 38 *ps* foi utilizado para gerar as distorções de sinal que são compensadas pelo dispositivo de compensação. Para acelerar a estatística dos DGDs e as flutuações de PMD, o emulador foi colocado próximo a lâmpadas incandescentes que foram acesas e apagadas aleatoriamente, variando a temperatura do emulador. Foram feitas ainda medidas freando as flutuações de PMD no emulador, submetendo este a uma estabilização da temperatura por meio de isolamento térmico. Esta outra situação de medida tinha como objetivo avaliar o desempenho do compensador em possíveis máximos locais que poderiam ocorrer. Nestas condições uma ou mais lâminas do controlador de polarização poderia alcançar o seu limite de operação, deixando de alinhar corretamente os PSPs do emulador com os da linha de atraso. No caso do seguidor de polarização (capítulo 4), esta situação não foi nenhuma vez visitada nos testes realizados com o algoritmo de controle (ver figuras 25 – simulação, e 31 – medida).

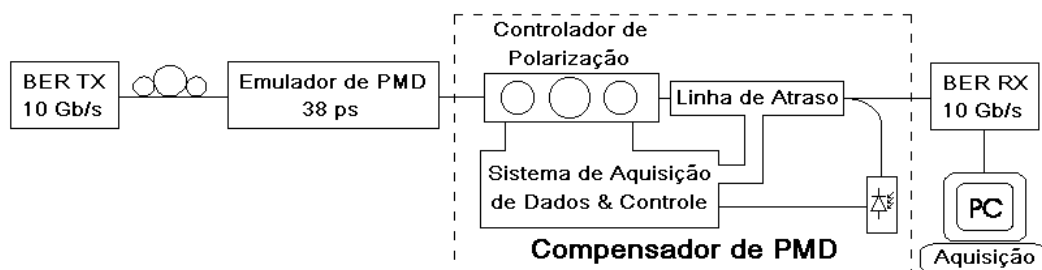


Figura 59 – Montagem experimental para medição utilizando o esquema de pós-compensação de 1ª ordem.

6.1.1.3. Pré-Compensação pelo PSP

A figura 60 mostra a montagem experimental usada para a transmissão do sinal óptico no PSP do emulador. Embora não tenha sido usada a definição do PSP para alinhar no PSP de entrada o sistema como em [56, 83], utilizou-se o mesmo sinal de realimentação do método de pós-compensação, a análise espectral, para realizar a compensação. No caso da pré-compensação, o sinal de

realimentação deve ser enviado para o lado de entrada do sistema e isto constitui uma desvantagem. O sinal de realimentação foi transmitido opticamente usando um laser DFB, um detector óptico e 80 km de fibra mono-modo standard (SMF). Foi utilizado um atraso de *software* no algoritmo de controle, entre a aquisição e a atuação para simular distâncias de enlaces maiores, e avaliar o tempo de resposta da pré-compensação pelo método de transmissão no PSP. Atrasos de software de até 50 ms foram testados, simulando tempos de ida e volta equivalente a enlaces de mais de 5000 km de distância. Nos testes realizados com o esquema de pré-compensação pelo método do PSP, só foram medidos os efeitos de alargamento na distribuição de BER sob condições de flutuação rápida na temperatura do emulador, fazendo com que o DGD e o PSP do emulador variassem bruscamente durante o intervalo de uma medida de BER, como será visto mais adiante.

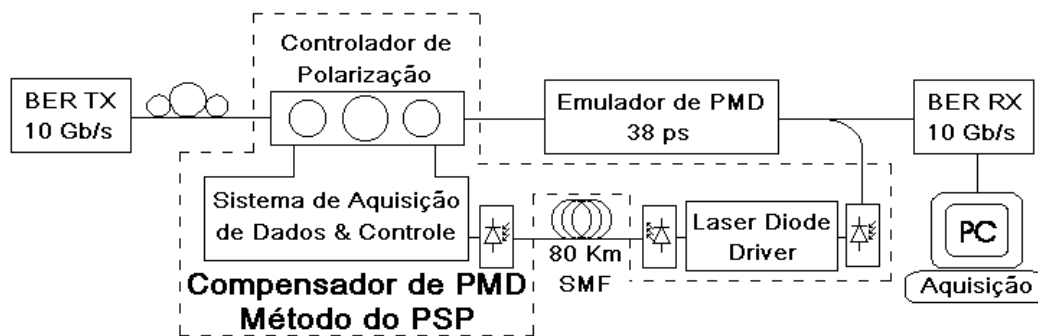


Figura 60 – Montagem experimental para medição utilizando o esquema de pré-compensação de 1ª ordem pelo método do PSP.

6.1.2. Resultados Experimentais

A figura 61 mostra uma comparação de medidas de BER entre os métodos de compensação de 1ª ordem nos esquemas de pós-compensação e pré-compensação. São colocados os histogramas de distribuição de BER para o sistema não compensado, para os esquemas de pós-compensação com linha de atraso fixa e variável e para o esquema de pré-compensação pelo PSP. Na figura 61 fica claro que todos os esquemas melhoram a BER do sistema, mas os esquemas que utilizam pós-compensação possuem uma distribuição de BER um pouco mais larga do que a obtida com o esquema de pré-compensação, embora

todas as medidas tenham sido feitas com a mesma potência óptica no receptor (-19.5 dBm).

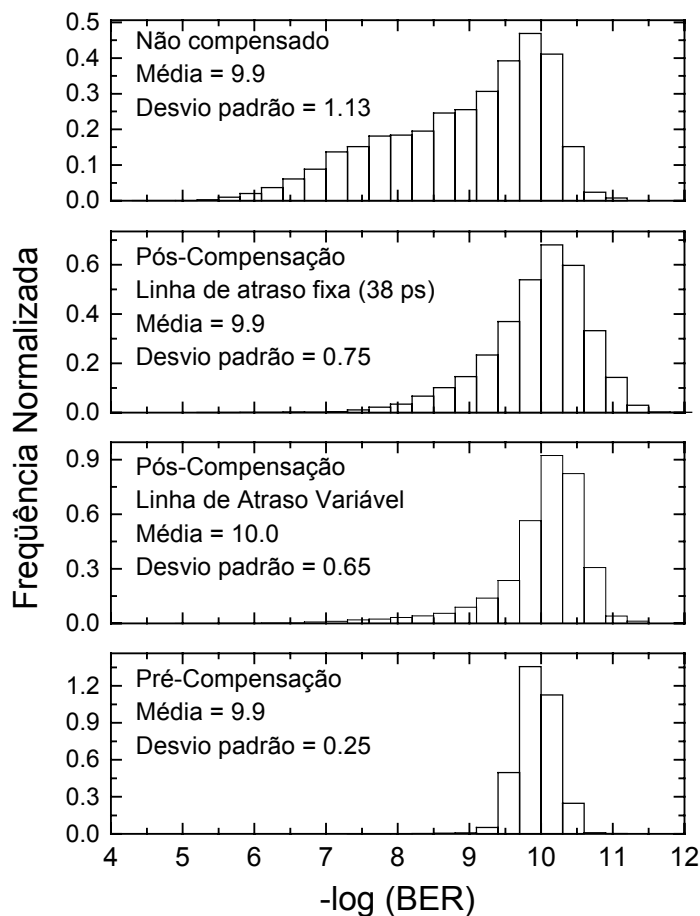


Figura 61 – Comparação entre distribuições das medidas de BER para os métodos de compensação de PMD.

Duas principais razões podem explicar as diferenças entre os resultados obtidos. A primeira delas é que na pós-compensação com linha de atraso variável se tem mais variáveis e sinais de controle que no esquema de pré-compensação. Isto provavelmente induz alguma perda na eficiência do sistema de alinhamento. A segunda delas é que a escala máxima de atraso no caso da linha de atraso variável é limitada a 90 ps (valor máximo da linha), com isso, valores de DGD maiores do que esse limite não serão completamente compensados, o que acarreta em uma penalização na BER.

Na medida de pós-compensação com linha de atraso fixa verifica-se uma distribuição mais larga do que na medida de BER com linha de atraso variável. Isto se deve ao fato de que em muitas situações o valor do DGD no emulador

ultrapassa o seu valor médio (PMD), e como a linha de atraso fixa utilizada possui o valor médio da PMD (38 ps), esta deixa uma penalização residual na compensação, caso o DGD do emulador seja muito maior ou menor que o valor do atraso da linha de atraso (38 ps).

O esquema de pré-compensação pelo PSP sem nenhuma dúvida é o que melhor compensa os efeitos de PMD, embora na medida mostrada aqui o enlace testado tivesse apenas 80 km de fibra, e um atraso de software no algoritmo de controle, que simulava o atraso no percurso de 80 km de ida, para totalizar os 160 km do percurso para o sinal de realimentação.

Na figura 62 é apresentada a distribuição de penalidade de potência para as mesmas medidas da figura 61. Para a obtenção desta curva foi utilizada a curva de potência óptica em função da BER (*back-to-back*) do receptor óptico do medidor de BER. A partir desta curva calcula-se a variação na potência do sinal de RF, uma vez que a potência óptica no receptor foi mantida constante, (-19.5 dBm). Cabe salientar que aqui ficam mais visível as diferenças entre as medidas realizadas com o esquema de pós-compensação com linha de atraso fixa e variável. No sistema não-compensado encontram-se penalidades de potência de até 2.25 dB, enquanto que, no esquema de pós-compensação com linha de atraso variável encontram-se penalidades de, no máximo, 1 dB. No esquema de pré-compensação pelo PSP, a maior penalidade encontrada foi de 0.4 dB, demonstrando uma excelente performance.

Na figura 63 são apresentadas quatro medidas típicas do valor de DGD na linha de atraso do compensador em função do tempo para as medidas de BER sob flutuações rápidas, durante a compensação. Na figura menor é colocada a estatística referente às quatro medidas. Na figura maior é claramente visto que uma grande escala de valores de DGD está sendo coberta durante os intervalos de 10 s de cada medida de BER. Esta pequena amostra é colocada aqui para ilustrar o que acontece com o DGD da linha de atraso ao longo dos intervalos de 10 s de medida de BER. Este comportamento indica que os valores medidos de BER representam por si só o comportamento médio da BER, uma vez que o DGD variou brusca e aleatoriamente durante uma única medida, gerando uma distribuição.

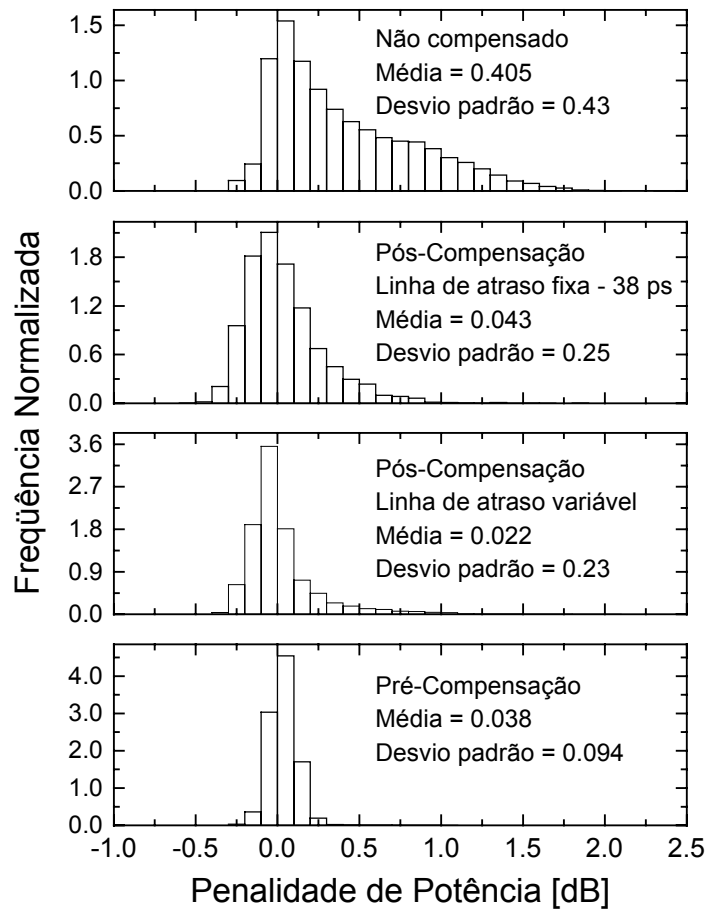


Figura 62 – Comparação entre as distribuições de Penalidade de Potência para os métodos de compensação de PMD.

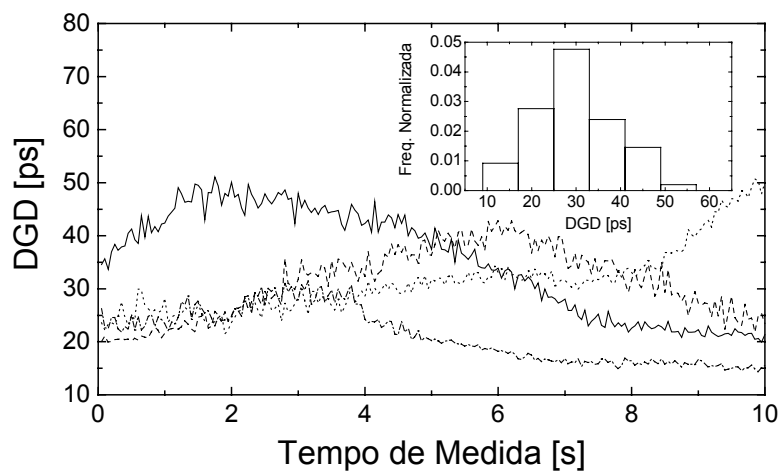


Figura 63 – Evolução temporal da linha de atraso do compensador. A figura menor representa a distribuição estatística dos DGDs.

A figura 64 dá confirmação a evolução do DGD, através da excursão do PSP de entrada do emulador, mostrado na esfera de Poincaré. A figura 64 (a) mostra 45 s de medida do PSP de entrada do emulador, onde este evolui da polarização linear x para elíptica e novamente retorna para várias situações de polarização linear, durante 4 medidas de BER de 10 s. A figura 64 (b) mostra que em 1 hora de medida a esfera já está inteiramente coberta.

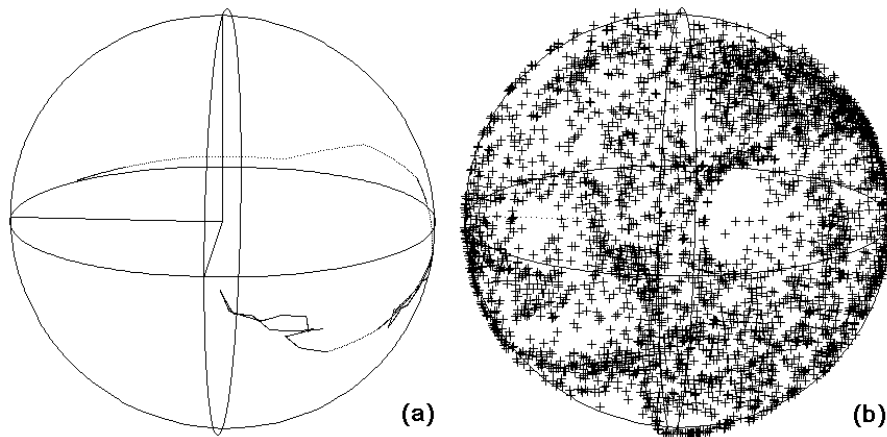


Figura 64 – Excursão do PSP de entrada: (a) 45 segundos e (b) 1 hora de medida.

Esta constatação, juntamente com o que foi mostrado na figura 63, permite afirmar que as medidas sob flutuações rápidas do emulador com aproximadamente 7000 pontos de medida de BER para cada um dos esquemas de compensação estudados correspondem a uma estatística confiável da excursão do DGD, incluindo situações de valores de DGD de baixa probabilidade, como 3, e até 4,5 vezes o valor da PMD do emulador como será mostrado mais adiante no histograma de registro dos valores de DGD na linha de atraso.

Na medida com estabilização térmica do emulador, e, portanto com flutuações lentas do DGD, testes com mais de 300 horas de duração foram realizados para confirmar a confiabilidade estatística da medida e avaliar o desempenho do compensador. A figura 65 apresenta a comparação entre os dois tipos de abordagens de medida, para o esquema pós-compensação com linha de atraso variável. Nesta comparação o mesmo valor médio de BER e de desvio padrão foi observado. Apesar das distribuições serem ligeiramente diferentes, a semelhança é marcante, sendo este um teste de validação adicional que mais uma vez confirma a abordagem correta dos testes sob flutuação acelerada do DGD.

Outra comprovação importantíssima que este teste permitiu foi a verificação de que não há ocorrências graves de situações em que o compensador fique preso a máximos locais de baixo desempenho.

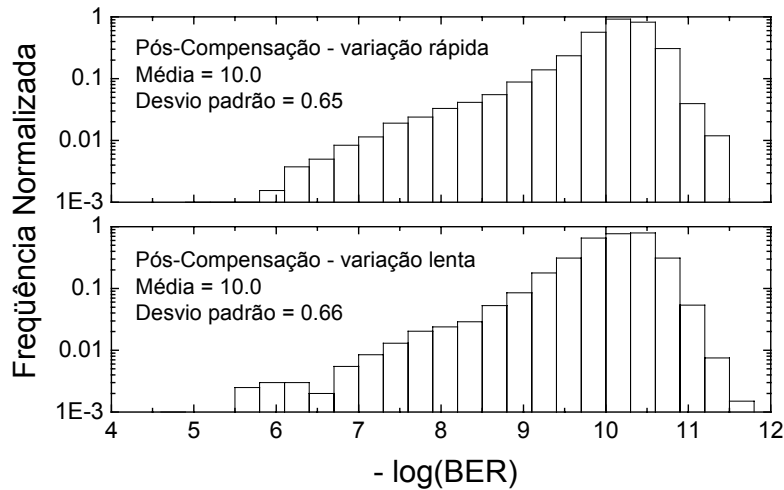


Figura 65 – Comparação entre medidas de compensação com variação rápida e lenta do DGD.

Na figura 66 é mostrado o histograma dos valores de DGD da linha de atraso gravados a uma velocidade de 20 *Hz* durante uma hora de experimento (dados de um número maior de horas foram comparados e a estatística obtida manteve o mesmo comportamento). Nesta figura pode-se notar uma distribuição Maxwelliana abaixo dos 50 *ps* somada a uma distribuição crescente com pico em 80 *ps* e corte em 90 *ps* (valor máximo da linha). Considerando o número de pontos acumulados em 90 *ps*, conclui-se que o DGD do emulador excedeu o valor máximo da linha de atraso com uma probabilidade muito maior do que a probabilidade cumulativa do valor do DGD ser maior do que seu o valor médio. Isto pode ser considerado aceitável, para as medidas realizadas sob flutuações rápidas do DGD, uma vez que os resultados apresentados anteriormente, nas figuras 63 e 64, já demonstravam esta tendência. O aspecto da curva de distribuição dos DGDs da linha de atraso é diferente do obtido na figura 63, e isto pode ser explicado pelo fato de que o compensador pode estar usando a linha de atraso para compensar o emulador de duas maneiras: através da minimização do DGD total (emulador – linha de atraso) ou pelo alinhamento do PSP de entrada do conjunto (emulador + linha de atraso) no SOP_{in} [57, 60, 62, 63], como explicado

anteriormente. No caso da figura 63 o compensador só estava compensando a PMD do emulador através da minimização do DGD total.

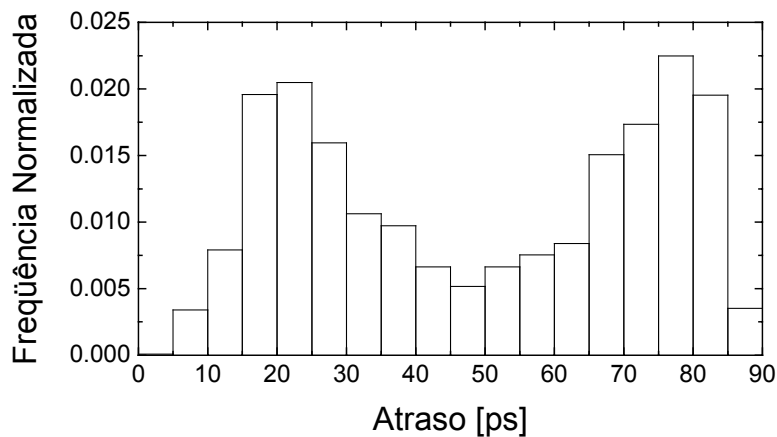


Figura 66 – Estatística da linha de atraso variável durante uma hora de medida.

Com relação aos testes com linha de atraso fixa no compensador de PMD uma importante questão é qual valor de DGD deve ser utilizado na linha de atraso. Para isso medidas utilizando diferentes valores de DGD na linha de atraso foram realizadas. Na figura 67 são mostrados os resultados através do gráfico do desvio padrão de $-\log(\text{BER})$ em função do DGD da linha atraso.

O primeiro ponto da curva é para o caso do sistema não compensado, que obviamente tem o maior desvio padrão. O segundo ponto foi medido com um atraso fixo de 20 ps na linha de atraso, obtendo-se uma performance melhor que com o sistema não-compensado, embora o valor da PMD do emulador (38 ps) não fosse completamente compensado, pois sobravam 18 ps de penalização residual, sem contar situações em que a PMD aumentasse.

O melhor resultado foi obtido com o valor de 38 ps de DGD na linha de atraso, mesmo valor da PMD do emulador, estes valores também são utilizados em [57-59].

A fim de avaliar o comportamento do compensador utilizando valores fixos de atraso, maiores do que o valor da PMD do emulador, foram feitas medidas com 60 e 80 ps de DGD na linha de atraso.

O desempenho obtido foi pior que com o valor da PMD do emulador (38 ps), mas este apresentou uma tendência de estabilizar o desvio padrão, dando a impressão que, utilizando valores maiores de DGD na linha do que o valor da

PMD do emulador, o desempenho da compensação estabiliza, obtendo-se sempre o mesmo desvio padrão, conforme mostram os dois últimos pontos da figura 67.

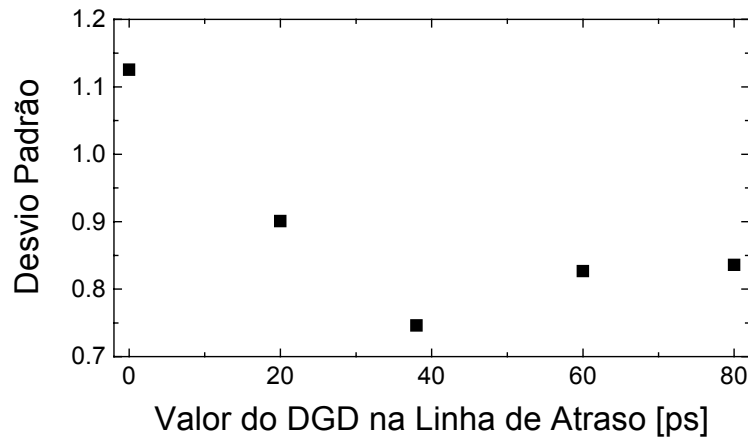


Figura 67 – Desvio padrão do log (BER) em função de diferentes valores de atraso para linha de atraso fixa do compensador.

A fim de avaliar os limites de tamanho de enlace usando o método de pré-compensação pelo PSP, foram medidas as estatísticas de BER para diferentes tamanhos de enlace (80 km, 1280 km e 5120 km). Os resultados obtidos para a BER média e para o desvio padrão são mostrados na figura 68. A BER média apenas duplica enquanto que o desvio padrão aumenta de quase uma década para os diferentes tamanhos de enlace testados. Isto ocorre porque o tempo de resposta do compensador em relação às variações do PSP de entrada aumenta muito devido ao tempo de viagem de ida e volta do sinal de realimentação. O aumento no valor médio da BER pode ser compensado por um ajuste na sensibilidade do receptor, e encarado, portanto como um problema secundário. Mas o aumento no desvio padrão implica em uma penalidade muito maior, demonstrando que o controlador de polarização na entrada do emulador não consegue acompanhar a excursão do PSP do emulador.

As medidas realizadas comprovam que o esquema de pré-compensação pelo PSP pode ser considerado robusto para enlaces amplificados de até 1000 km de distância, sem um aumento significativo na penalidade de potência. Ainda assim, enlaces maiores podem ser considerados, desde que a evolução do PSP seja lenta o suficiente, como nos enlaces submarinos [13, 38], para que o controlador de polarização do compensador possa seguir. Deve-se ainda acrescentar que a faixa

passante dos sinais de realimentação no esquema testado é baixa o suficiente para que não representem um problema no que diz respeito a efeitos de dispersão cromática, inclusive no enlace mais longo medido aqui (5120 *km*). A faixa dinâmica do sinal de realimentação também é grande o suficiente para que se possa utilizar transmissões amplificadas em comprimentos de onda marginais ao WDM de um sistema de comunicação, mesmo como uma menor potência de amplificação, o que pode tornar este esquema uma opção confiável para compensação de PMD.

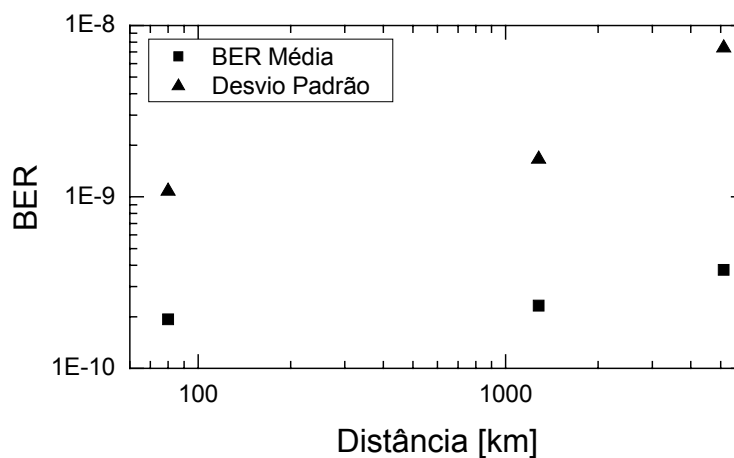


Figura 68 – BER média e desvio padrão usando o método do PSP em enlaces de diferentes distâncias.

Finalmente, na figura 69 é apresentado um resumo comparativo entre os diferentes esquemas de compensação estudados, sendo apresentadas curvas de probabilidade cumulativa em função do log (BER). Estas curvas foram obtidas pela integração das curvas de distribuição do log (BER) apresentadas anteriormente.

Nesta figura mais uma vez constata-se que o método de compensação que apresenta o melhor desempenho dentre os testados é o método de pré-compensação pelo PSP para um enlace de 80 *km*. O método de pós-compensação com linha de atraso fixa (LAF) e variável (LAV) é um pouco melhor que o método do PSP para baixos valores de BER, mas apresenta um valor mais elevado de BER a partir de probabilidades de 0.4.

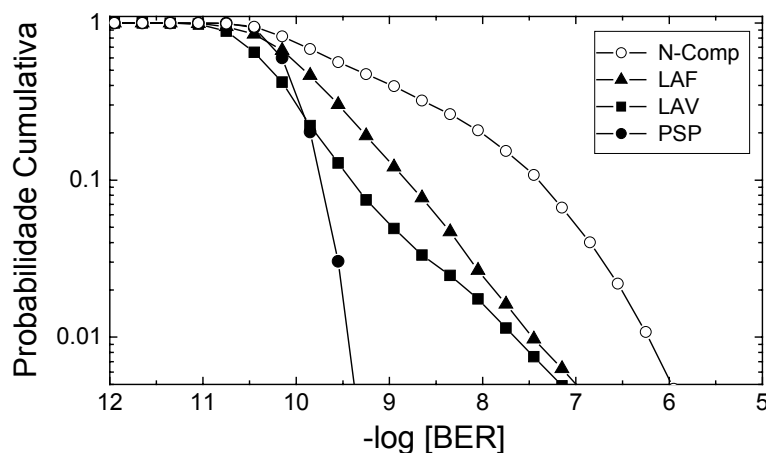


Figura 69 – Probabilidade Cumulativa para os diferentes esquemas de compensação: (N-Comp) sistema não compensado, (LAF) e (LAV) pós-compensação de 1ª ordem linha de atraso fixa e variável, respectivamente, e (PSP) pré-compensação pelo método de transmissão no PSP.

O esquema de pós-compensação com linha de atraso variável (LAV) apresenta uma probabilidade acumulada 3 vezes menor que o com linha fixa (LAF) para valores de BER de $\sim 10^{-9}$, mas esta performance se degrada tornando-se próxima da obtida com linha de atraso fixa para pequenas probabilidades acumuladas (0,005). Isto provavelmente se deve a maneira como o compensador está compensando o DGD do emulador, como discutido anteriormente, ver referências [57, 60, 62, 63]. A aproximação da curva de probabilidade acumulada dos esquemas com linha fixa e variável para pequenas probabilidades pode ser justificada pelas situações em que o atraso máximo gerado pela linha de atraso variável (limitado a 90 ps) é superado pelo valor de DGD no emulador.

7 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado um estudo da compensação da distorção de sinais em sistemas ópticos devido aos efeitos da PMD, considerada hoje em dia como o fator de maior limitação nos sistemas de transmissão óptica em geral [6-9].

O principal fator que motivou este estudo é o fato de que o custo de substituição de enlaces ópticos com PMD é muito elevado, sendo a compensação de PMD uma alternativa plenamente viável. Outro fator importante é o fato de que embora os processos de fabricação das fibras tenham evoluído bastante, ainda assim, a PMD não deixa de ser um fator limitante, à medida que a taxa dos enlaces de transmissão aumenta. Portanto, por menor que seja este fenômeno, a compensação de PMD sempre será necessária, a menos que os processos de fabricação das fibras, dos cabos e da instalação evoluam a ponto de não deixar nenhuma birrefringência residual nas fibras.

Um estudo sobre os emuladores e as linhas de atraso, avaliando o comportamento de emuladores com diferente número de seções e sua aplicabilidade não só como fonte de PMD, mas principalmente como linha de atraso ativa em compensadores de PMD, através de um modelamento matemático foi apresentado.

Foi feito um estudo do canal óptico através de medidas experimentais utilizando diferentes técnicas de medida para a caracterização da PMD em fibras ópticas de alta birrefringência, em emuladores de PMD, em cabos ópticos instalados e em dispositivos de compensação de dispersão cromática, visando caracterizar o comportamento espectral elétrico e óptico da PMD. Isto permitiu avaliar o potencial de utilização do método de filtragem espectral como sinal de realimentação para os sistemas de compensação de PMD. A correlação do DGD em diferentes comprimentos de onda em um emulador de PMD foi explorada. Duas técnicas de medida de PMD foram comparadas, as quais serviram para a caracterização da PMD em redes de Bragg de compensação de dispersão

cromática, alertando para alguns problemas que estes dispositivos podem apresentar se as fibras empregadas na fabricação tiverem birrefringência elevada.

Foram apresentadas as partes integrantes de um sistema de compensação, o seguidor de polarização e a linha de atraso. Um modelamento matemático utilizando um algoritmo de controle simplificado, desenvolvido durante este trabalho, teve sua performance avaliada, através da comparação entre os resultados obtidos nas simulações e os experimentais.

Foi desenvolvido um protótipo de um sistema de compensação de PMD 1ª ordem, que permitiu estudar toda a problemática não só dos efeitos de distorção de sinais por PMD, mas também soluções para a compensação de tais efeitos. Uma visão geral dos compensadores ópticos de PMD de 1ª ordem, seu princípio de funcionamento, os sinais de realimentação utilizados no controle dos compensadores, os diferentes esquemas de compensação e os principais aprimoramentos alcançados nos últimos anos foram discutidos.

Medidas de BER foram realizadas para avaliar o desempenho do compensador de PMD utilizando diferentes esquemas de compensação sob diferentes abordagens. A pós-compensação de 1ª ordem com linha de atraso fixa e variável mostrou um bom desempenho, embora o melhor resultado tenha sido obtido com a pré-compensação pelo método do PSP. A pós-compensação com linha de atraso fixa se mostrou o menos eficiente dos esquemas de compensação, mesmo com o DGD da linha de atraso otimizado.

A estatística dos valores de DGD observados na linha de atraso, durante a compensação de PMD, indicaram a ocorrência das duas possibilidades de compensação: a subtração dos vetores PMD da linha de atraso e do emulador, ou a coincidência do estado de polarização de entrada com o PSP do conjunto emulador + linha de atraso, equivalendo-se, nesta situação, à compensação pelo PSP.

A comparação entre as abordagens de medida da BER com os diferentes esquemas de compensação permitiu confirmar a validade dos resultados obtidos sob flutuações rápidas do emulador, incluindo situações de valores de DGD de baixa probabilidade, como 3, e até 4,5 vezes o valor da PMD do emulador. Outra comprovação importantíssima foi a verificação de que não há ocorrências graves de situações em que o compensador fique preso a máximos locais de baixo desempenho.

Com o esquema de pré-compensação pelo PSP foram medidas estatísticas de BER para diferentes comprimentos de enlace, mostrando que os efeitos de PMD para enlaces de até 1000 *km* de extensão são facilmente compensados, tornando este método potencialmente útil, para enlaces com flutuações lentas de PMD como, por exemplo, enlaces submarinos.

O desempenho obtido com o esquema de pós-compensação de PMD com linha de atraso variável permite afirmar que o protótipo de compensação desenvolvido apresenta resultados de compensação melhor do que os obtidos com outros sistemas de compensação [22, 60]. No caso do esquema de pré-compensação não foram encontrados na literatura resultados experimentais que pudessem ser diretamente comparados com os obtidos, mas estes por si só provam um bom desempenho do protótipo e do algoritmo desenvolvido.