

## 5 Conclusão

Modelos matemáticos são essenciais para diversas áreas científicas, sejam elas exatas, humanas, sociais ou biológicas. A modelagem de um determinado problema, apesar de muitas vezes corresponder a uma simplificação da condição analisada, é válido na tentativa de prever situações e compreender as interdependências entre os diversos fatores.

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta para simulação de evolução temporal e consequente estudo do comportamento da PMD em fibras ópticas e sistemas com múltiplos comprimentos de onda.

A princípio, a preocupação foi a validação do simulador. Isto se deu através da comparação dos dados temporais obtidos com a metodologia normalmente usada na literatura, empregando médias espectrais. O resultado obtido com o simulador desenvolvido se mostrou em excelente concordância com os dados clássicos, gerados a partir de simulações com variação espectral. A estatística dos dados também se mostrou coerente com a teoria conhecida.

Verificou-se que as médias espectrais para PMD's pequenas pode levar a resultados pouco seguros, devido à pequena variabilidade dos estados visitados com a frequência óptica, resultando numa estatística pobre. Logo, uma faixa, maior, próximo a  $600\text{ nm}$  foi utilizado para realizar os cálculos de autocorrelação para valores pequenos de PMD, como  $1\text{ ps}$ . O simulador temporal, entretanto, não sofre dessa limitação. Os resultados simulados para o comportamento temporal de diferentes canais mostrou que para transmissões em  $10\text{ Gb/s}$  os canais estarão descorrelacionados se o valor da PMD for alto o bastante para afetar a transmissão. No caso de transmissões em  $40\text{ Gb/s}$ , já afetadas por PMD's tão baixas como  $4\text{ ps}$ , verifica-se uma correlação de cerca de  $50\%$  entre canais vizinhos. Resultados experimentais envolvendo-se o sinal de RF como avaliador do nível de distorção confirmaram os resultados da simulação na faixa de  $10\text{ Gb/s}$ .

Foi discutido um modelo para a PMD, o *hinge model*, proposto mais

recentemente em [40] e [39]. As variações lentas na evolução da PMD nos sistemas quando os cabos estão enterrados acontecem devido às variações sazonais nas condições do ambiente. Neste modelo é assumido que fibras que apresentam essa variação lenta estão intercaladas com elementos (pontes, por exemplo) que produzem variações rápidas no valor do DGD, ou seja, que agem como rotatores de polarização [57]. E estas variações se demonstram de forma diferente no caso de transmissão de múltiplos canais. Neste caso, os canais mostram distribuições estatísticas diferentes, conflitando com o modelo clássico onde todos os canais possuem a mesma distribuição maxwelliana.

Os resultados encontrados, para as simulações de *hinge model* estiveram de acordo com as expectativas. Foi percebida uma variação de até 100% entre o DGD médio de 20 canais, para um sistema composto por dois *hinges* e três fibras de  $\sim 1$  ps. Também foi visto que o número de *hinges* do sistema exerce uma forte influência na estatística dos canais, sendo que quanto maior o número de *hinges* menor é o espalhamento do valor do DGD entre os canais.

Foi discutida a utilização de FEC em sistemas ópticos. Esse códigos geralmente são utilizados para erros aleatórios, caso diferente do que acontece em sistemas perturbados por PMD, onde existem rajadas de erros nos momentos em que o sistema entra em uma situação de alta PMD e permanece nele [58]. O FEC foi utilizado em combinação com misturadores de polarização para evitar que essas rajadas de erro aconteçam. Estes misturadores, quando utilizados na entrada do enlace, aceleram a dinâmica do sistema variando o estado de polarização do sinal de entrada rapidamente [41].

Foram realizados testes envolvendo controle de polarização. Conforme esperado, quanto menor o espaçamento entre canais, melhor é o resultado do controle conseguido. Foram testados dois tipos de realimentação para o controle, envolvendo canais adjacentes: o sinal de um dos canais adjacentes ao canal a ser controlado ou a média dos sinais dos dois canais adjacentes ao canal a ser controlado. Os resultados obtidos para o segundo caso se mostraram mais eficientes, devido a uma maior semelhança dessa situação com o controle perfeito, que é um canal sendo controlado por ele mesmo sem a existência de outros fatores de erro.

Foi simulado um sistema de compensação de PMD para sistemas onde um controlador de polarização é inserido exatamente no meio do enlace

de fibra (*mid-span*), de forma que o sinal que entra na segunda metade do enlace tente compensar os efeitos dispersivos que tenham ocorrido na primeira metade do enlace. Este modelo segue a idéia proposta em [37]. Nas simulações foi testada a inserção de um misturador de polarização na entrada do sistema e o resultado encontrado foi melhor do que a situação sem o uso de misturadores. O resultado obtido mostra uma melhora significativa na tolerância do sistema à PMD quando o controlador é utilizado.

Um outro sistema propondo compensação de PMD foi simulado. Neste, são utilizados: um misturador de polarização na entrada do sistema, um controlador de polarização e uma linha de atraso. Também é considerada a atuação de FEC, inserindo uma margem extra ao sistema. A princípio, foi simulado um sistema sem a presença do controlador e da linha de atraso, para comparar com os resultados publicados [36]. É excelente a concordância entre os dados simulados e os dados retirados desta referência. Com a introdução do controlador de polarização a performance do sistema foi aprimorada.

Foram realizadas algumas comparações entre os dados simulados e medidas experimentais. A primeira medida adquiriu dados de RF. Foi observado o comportamento do sinal de saída num sistema para quatro comprimentos de onda. O emulador utilizado nessa medida possui uma PMD igual a  $32 \text{ ps}$ , decorrelacionando os canais vizinhos. Os dados simulados tiveram ótimo ajuste aos dados medidos.

Foi realizado o controle de polarização de um determinado canal através do canal vizinho, espaçado de  $0,8 \text{ nm}$ . Os resultados obtidos mostram a melhora inserida pelo controle na polarização de saída do sistema. Quando da utilização do controlador, o SOP de saída consegue se manter estável, mantendo a variação em níveis pequenos. Quando não há a utilização do controlador, entretanto, o SOP se movimenta livremente na esfera de Poincaré. Foi observado um bom acordo entre dados medidos e simulados, para o SOP de saída, do sinal RF, tanto para uma fibra monomodo de  $30 \text{ km}$ , correspondente a uma PMD igual a  $0,6 \text{ ps}$ , quanto para um emulador de 20 segmentos com PMD de  $3,5 \text{ ps}$ .

Uma outra medida de controle de polarização foi realizada. Neste caso são utilizados três canais vizinhos: o canal que se deseja controlar (canal central) e dois canais adjacentes usados para o controle. São utilizados dois controladores de polarização, um para cada um dos canais adjacentes. A utilização do controle promove uma melhora significativa na variação do SOP de saída do sistema. A concordância entre os dados medidos e simula-

dos não se mostrou satisfatória, mas pode ser explicada principalmente pela diferença entre a quantidade de dados disponível para análise.

Uma última medida foi realizada, para testar compensação de PMD. O método utilizado foi de lançamento no PSP. São utilizados dois canais vizinhos, espaçados de  $0,8 \text{ nm}$ . Os resultados obtidos, tanto medidos quanto simulados, se mostraram com ótima semelhança. A utilização do método de compensação provê uma melhora na penalidade imposta ao sistema pela presença da PMD.