

1 Introdução

A crescente demanda por informação e uma mais ampla divulgação dos meios de comunicação eletrônica, como a internet, tem forçado as operadoras de telecomunicações a aumentar sua capacidade de tráfego, principalmente em grandes centros metropolitanos. Isso tudo, se deve ao fato que, cada vez mais, as pessoas utilizam a internet em seus negócios, comunicando-se por e-mail e por voz, para fazer compras, para transações bancárias e para lazer. Atualmente já existem serviços de vídeo conferência, *download* de músicas e filmes, emissoras de rádio e televisão via internet, o que torna a cada dia maior a demanda por taxas de transmissão mais elevadas. Um dos meios que têm a maior capacidade de atender tal aumento de demanda são os sistemas de comunicação óptica devido a sua enorme faixa passante, mais de 30 THz.

Os primeiros passos em direção a este desenvolvimento foram dados no início da década de 70 quando fibras ópticas de baixa perda foram desenvolvidas [1], junto com as melhorias alcançadas nos lasers semicondutores [2]. Embora as perdas nas fibras tenham sido reduzidas a 0.2 dB/km com o passar dos anos a expansão dos sistemas ópticos não aconteceu em larga escala até o desenvolvimento dos amplificadores ópticos na década de 80 [3], dando lugar à dispersão cromática como fator limitante nos sistemas de comunicação óptica em lugar das perdas. A dispersão cromática da fibra era relativamente fácil de se compensar devido a sua característica determinística. Com o aumento cada vez maior das taxas de transmissão dos enlaces, um novo obstáculo surgiu devido às birrefringências aleatórias nas fibras, causando alargamento nos pulsos ópticos. Este fenômeno, conhecido como Dispersão dos modos de polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*), é conhecido desde o final da década de 70 [4] e devido aos padrões de transmissão dos enlaces dessa época, a distorção causada por este fenômeno foi considerada desprezível para aplicações práticas [5], já que as taxas de transmissão eram tão baixas. A PMD começou a ser considerada um

fator limitante quando as transmissões dos sistemas ópticos passaram a alcançar taxas da ordem de alguns *Gb/s*.

Tanto é assim que hoje em dia a PMD é considerada como a maior limitação nos sistemas de transmissão óptica em geral [6-9], sendo encontrada em maior escala principalmente em enlaces ópticos antigos, nos quais o processo de fabricação das fibras e dos cabos não era tão apurado, constituindo assim um objeto de estudo em busca de soluções que possam contornar de maneira eficaz as distorções de sinal devido a este fenômeno [21, 22, 46-88].

Um dos maiores obstáculos para a compensação da PMD se deve ao fato deste fenômeno variar de maneira aleatória em função do tempo [12, 13, 16, 24], dificultando assim sua compensação. A compensação dos efeitos da PMD através de compensadores adaptativos pode significar uma possibilidade para contornar a limitação nas taxas de transmissão dos enlaces ópticos, com uma complexidade relativamente baixa, quando comparada aos custos envolvidos na substituição, por exemplo, de cabos com PMD elevada.

Neste trabalho desenvolveu-se um protótipo de um sistema de compensação de PMD 1ª ordem a fim de se estudar toda a problemática não só dos efeitos de distorção de sinais por PMD, mas soluções na compensação de tais efeitos.

No capítulo 2 será apresentada a teoria da polarização da luz, abordando os formalismos matemáticos para as representações por vetores de Jones, os parâmetros de Stokes e a representação de Poincaré. Esta revisão tem por objetivo fundamentar muitas das expressões matemáticas que serão empregadas nos capítulos 3, 4 e 5. Em seguida é apresentada a teoria da PMD, onde serão estudadas suas origens e definições, sua variação no tempo, sua dependência com o comprimento de onda e sua estatística. Em uma última parte será apresentada 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.

No capítulo 3 será apresentado um estudo sobre os emuladores e as linhas de atraso. Um modelamento matemático permite avaliar o comportamento de emuladores com diferentes números de seções e comparar os resultados simulados com resultados experimentais, visando estudar sua aplicabilidade não só como

fonte de PMD, mas principalmente como linha de atraso ativa em compensadores de PMD.

No capítulo 4 será feita a caracterização do canal óptico através de medidas experimentais utilizando diferentes técnicas de medida de PMD em fibras ópticas de alta birrefringência, em emuladores de PMD, em cabos ópticos instalados e em dispositivos de compensação de dispersão cromática. Tais medidas têm por objetivo caracterizar o comportamento espectral elétrico e óptico da PMD, visando avaliar o potencial de utilização do método de filtragem espectral como sinal de realimentação para os sistemas de compensação de PMD. A medida do atraso diferencial de grupo (DGD – *Differential Group Delay*) em diferentes comprimentos de onda também será avaliada ao longo do tempo, visando estudar sua correlação no tempo e na frequência óptica. No final do capítulo duas técnicas de medida de PMD são comparadas na avaliação de redes de Bragg de compensação de dispersão cromática. Medidas das flutuações no atraso diferencial de grupo provam que estas estão intimamente ligadas a birrefringência da fibra onde a rede foi gravada.

No capítulo 5 será apresentado o principal elemento de um sistema de compensação, o seguidor de polarização, onde um algoritmo de controle para o sistema seguidor da polarização foi desenvolvido matematicamente. Este algoritmo de controle opera com seus atuadores completamente livres de re-inicializações. Isto foi conseguido empregando uma lógica que procura caminhos que contornem situações em que um ou mais atuadores tendam a chegar a suas bordas de operação sem prejudicar o nível de sinal. Os resultados das simulações matemáticas do modelo do seguidor de polarização e do algoritmo de controle desenvolvido são comparados com resultados experimentais, obtidos com um protótipo de seguidor de polarização.

No capítulo 6 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 o desempenho do protótipo desenvolvido é melhor que a obtida com outros sistemas de compensação [22, 60].