

1. Introdução

A presente dissertação descreve o desenvolvimento e a realização de um sistema de “*Controle do Estado de Polarização da Luz em Sistemas Ópticos*” de sinais propagantes em fibras ópticas. Esta pesquisa foi desenvolvida no laboratório do Grupo de Sistemas Ópticos e Micro-ondas (GSOM) do Centro de Estudos em Telecomunicações (CETUC) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

A intensa e crescente utilização do espectro eletromagnético em sistemas de comunicações, nas últimas décadas, levou à busca de condições e meios que permitissem ampliar e otimizar seu emprego. Os resultados têm aparecido sob diversas formas, sendo interessante destacar o progressivo aumento na frequência da onda eletromagnética. Quando um sinal óptico com largura de linha reduzida é introduzido por um laser DFB (*Distributed Feedback*) na entrada de uma fibra óptica monomodo, o SOP (*State of Polarization*) na extremidade de saída pode ser fortemente alterado [1]. Este efeito resulta da característica verificada em alguns materiais ópticos de apresentarem índices de refração com valores diferentes para polarizações ortogonais, denominado de birrefringência. As variações de temperatura e distúrbios mecânicos nas fibras ópticas provocam alterações no modo propagante e a geração destas componentes ortogonais. Em muitas aplicações o SOP varia de forma contínua e errática e penaliza os sistemas ópticos de comunicações de forma significativa.

Durante a operação de um sistema comercial, são gerados dois modos ortogonais que se propagam com velocidades diferentes [2]. Os dois modos são detectados na extremidade da fibra óptica em instantes diferentes e ao superporem-se, provocam a recepção de um pulso alargado e com amplitude reduzida. Este efeito é então resultante da dispersão da velocidade de grupo devido à birrefringência das fibras [3] sendo denominado de PMD (*Polarization Mode Dispersion* – Dispersão de Modo de Polarização). O retardo entre as componentes ortogonais é denominado de DGD (*Differential Group Delay* –

Atraso Diferencial de Grupo). O retardo máximo tolerável de um sistema óptico situa-se em torno de 14 % da duração de um bit da conexão. Para um sistema operando na taxa de 10 Gbs (gigabits), o retardo máximo seria então em torno de 14 ps [4]. Outro conceito importante é de PDL (*Polarization Dependent Loss*), que pode ser definida como $10\log(T_{\text{máx}}/T_{\text{mín}})$, onde $T_{\text{máx}}$ e $T_{\text{mín}}$ são as transmissões máxima e mínima do dispositivo para todos os SOP de entrada. A PDL é um dos requisitos mais importantes para a caracterização de componentes passivos e no desempenho da rede óptica [5].

Dispositivos de controle de polarização foram inicialmente realizados através de configurações eletromecânicas capazes de pressionar e torcer as fibras ópticas [6]. Nas aplicações seguintes, utilizaram-se dispositivos denominados de lâminas de fração de onda ou retardadores capazes de introduzir retardos de um quarto (1/4) e um meio (1/2) do comprimento de onda [7] e também retardos de ordem múltipla, através da associação de várias seções de um meio (1/2) ou um (1) comprimento de onda. Como os retardos podem atuar de forma diferenciada nas componentes dos campos elétricos, variações significativas podem ser obtidas no SOP e implementar o casamento e controle da polarização em dispositivos e sistemas ópticos. Mais recentemente, guias de ondas ópticos realizados em Niobato de Lítio (NiLO_3) [8] foram configurados para que seu índice de refração se apresentasse sensível à tensões externas. Estes dispositivos são denominados de retardadores eletro-ópticos e por serem realizados através de múltiplas seções possibilitam o controle do SOP com grande flexibilidade.

Algumas fibras ópticas instaladas apresentam um coeficiente de PMD em torno de $0,8 \text{ ps}/(\text{km})^{1/2}$ [5]. Desta forma, um enlace de 10 Gbs teria seu comprimento limitado pela PMD em 306 km. Entretanto, uma parcela significativa das infraestruturas de fibras instaladas apresenta coeficientes de PMD superiores ao indicado e são inadequadas para operar na taxa de 10 Gbs e em taxas superiores. As penalidades devida à PMD tornam-se mais severas com o aumento das taxas de bits [9] (redução do *bit slot*). Enlaces na taxa de 40 Gbs já estão operando comercialmente [4]. O padrão IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.3ba dedicado a taxa de 100 Gbs já foi estabelecido em Junho/2010. Desta forma, fica evidenciada a importância do controle da PMD.

Os procedimentos associados ao controle de polarização de sinais propagantes em fibras ópticas foram e tem sido utilizados em compensadores de

PMD, sensores, chaves fotônicas, regeneradores ópticos, sistemas ópticos coerentes e sistemas ópticos com PolMUX (*Polarization Multiplex* – multiplexação em polarização).

Com o aumento das taxas de operação dos sistemas ópticos, a utilização de novos formatos de modulação [10] com elevada eficiência espectral (QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying* – mudança de fase por quadratura, DQPSK – *Differential Quadrature Phase Shift Keying* – mudança de fase por quadratura diferencial, 16QAM (*16 State Quadrature Amplitude Modulation*), com constelação de 16 símbolos, 64QAM (*64 State Quadrature Amplitude Modulation*) com constelação de 64 símbolos, e a utilização da multiplexação em polarização, o controle de polarização em velocidades elevadas tornou-se indispensável [11].

Um controlador de polarização deve transformar um SOP arbitrário em sua entrada em outro estado de polarização específico em sua saída, operando de forma a manter o controle de polarização mesmo quando o SOP variar significativamente. Outra característica destes dispositivos é manter a perda de inserção reduzida para qualquer SOP do sistema. As primeiras configurações dinâmicas capazes de rastrear o SOP foram desenvolvidas em 1987, operavam em 0,1 rad/s [12]. Nas duas décadas seguintes, atingiram 15 krad/s. As variações do SOP podem ocorrer em intervalos de tempo inferior a 100 μ s. O controle de polarização nos sistemas que operam em 100 Gbs e em longas distâncias com detecção direta que utilizam PolMux, estão implementados em velocidades de rastreamento acima de 40 krad/s.

O estudo de técnicas de controle e rastreamento do estado de polarização de sinais em velocidade da ordem de ou superiores a 40 krad/s em sistemas ópticos que utilizam multiplexação em polarização e o desenvolvimento destes sistemas é um tema de pesquisa na atualidade, sendo objeto dos principais periódicos e conferências científicas na área de comunicações ópticas.

As principais motivações desta dissertação resultam da atualidade do assunto, da possibilidade de sua realização prática, da associação da tecnologia óptica com o desenvolvimento de novas técnicas de sincronização e com o perfil da equipe do laboratório GSOM do CETUC/PUC-Rio para a realização de projetos avançados.

Além da presente introdução, no Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos primordiais para compreensão da teoria óptica eletromagnética e a importância da *Esfera de Poincaré* como uma ferramenta muito utilizada para identificação dos três possíveis estados de polarização da luz e suas respectivas características: estados de polarização linear, circular e elíptica. No Capítulo 3 são apresentados os componentes indispensáveis à montagem de um sistema para o controle do SOP em fibras ópticas. Neste estudo, aborda-se detalhadamente a linguagem de programação gráfica LabVIEW, sendo este um instrumento virtual de grande auxílio para o desenvolvimento do algoritmo de controle. O Capítulo 4 apresenta a bancada óptica desenvolvida, a descrição do diagrama de blocos desenvolvido para controle de polarização em velocidades moderadas e os resultados obtidos são relatados. Ainda neste capítulo, uma nova solução para controle do SOP em sistemas multiplexados opticamente é apresentada. Finalmente no Capítulo 5 são apresentados os comentários finais e as conclusões referentes a esta dissertação.

A partir da descrição acima, os principais objetivos da presente dissertação podem ser destacados segundo os seguintes itens:

- 1) Estudo e seleção dos principais modelos capazes de descrever as transformações dos SOP de um sinal óptico.
- 2) Avaliação dos dispositivos ópticos de baixo custo visando o desenvolvimento prático de um sistema dedicado ao controle do SOP de um sinal óptico.
- 3) Desenvolvimento e realização de um sistema de baixo custo dedicado ao controle de polarização de sinais ópticos.
- 4) Desenvolvimento de um sistema de controle de polarização de sinais ópticos multiplexados.