

3

O sistema de controle de polarização e o compensador de PMD

Basicamente, os protótipos do sistema de controle de um SOP, de todos os SOPs e do mitigador de PMD têm a mesma plataforma com algumas diferenças básicas, que veremos ao longo deste trabalho. As partes essenciais dos protótipos desenvolvidos são: a plataforma principal de controle e processamento, com seu algoritmo e seus conversores analógico/digital e digital/analógico; o controlador de polarização; e; no caso do compensador de PMD, as linhas de atraso e a detecção do sinal de RF. Discutiremos sobre estas e outras partes brevemente neste capítulo.

3.1.

O controlador de polarização

Atualmente, uma grande variedade de controladores de polarização pode ser encontrada comercialmente. Para isto, utilizam-se diversas técnicas para alterar a polarização da luz. Basicamente, o fundamento para que esta rotação seja feita consiste em alterar a birrefringência do meio, fazendo com que as componentes do campo tenham uma maior ou menor diferença de fase entre si, alterando assim a polarização da luz. Os principais controladores de polarização são:

- Manuais por torção, tipo “orelha de Mickey” e similares;
- Eletromecânicos por pressão, através de piezoelétricos;
- Eletro-ópticos, como os de LiNbO_3 e os de cristal líquido.

Nesta tese, iremos abordar apenas o controlador de polarização de niobato de lítio, dado que ele pode atingir frequências da ordem de gigahertz, ou seja, até 5 ordens de grandeza mais rápido, se comparado aos piezoelétricos, dado que o nosso objetivo é realizar um controle com a maior velocidade possível.

Com o desenvolvimento dos guias de onda e da microeletrônica, recentemente, surgiram os controladores de polarização de niobato de lítio (LiNbO_3), que têm seu princípio de funcionamento baseado no efeito Kerr. Esse material foi escolhido por ter alto coeficiente eletro-óptico, além de ser bastante estável termicamente [26]. Esses guias são fabricados com eletrodos montados numa disposição específica, para que, de acordo com a tensão elétrica aplicada nos eletrodos, um campo elétrico seja gerado, induzindo uma alteração na birrefringência do guia de onda, fazendo com que o vetor de polarização da luz mude de direção. Observando a figura 14, podemos compreender melhor como a disposição dos eletrodos e o sentido da polarização influenciam no campo gerado.

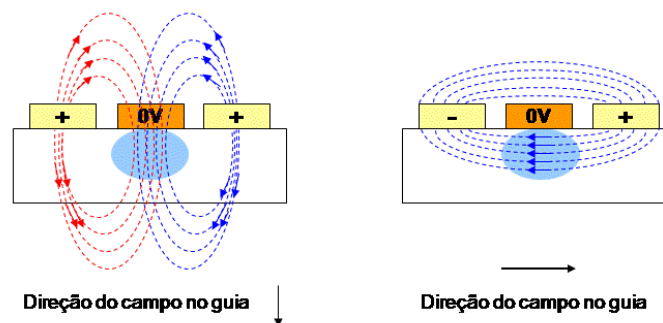


Figura 14 (a e b) - Direção do campo elétrico no guia em um controlador de polarização de LiNbO_3 .

Na Figura 14(a), a polarização da tensão aplicada nos eletrodos é a mesma, o que gera um campo vertical através da seção transversal do guia. Já na figura 14(b) a polarização da tensão aplicada nos eletrodos é contrária, o que gera um campo horizontal através da seção transversal, fazendo com que a polarização gire ortogonalmente na esfera em relação ao campo aplicado em 14(a).

Além de simplificar o processamento do controle, uma das maneiras mais eficazes de se alcançar qualquer ponto na superfície da esfera de Poincaré, ou seja, obter qualquer estado de polarização de saída no controlador de polarização, para qualquer estado de entrada, é utilizarmos, alternadamente, as várias seções do controlador, fazendo com que cada seção gire a polarização da luz em eixos na esfera perpendiculares entre si. Assim, optamos por utilizar esta técnica, a fim de se alcançar uma melhor resposta do sistema.

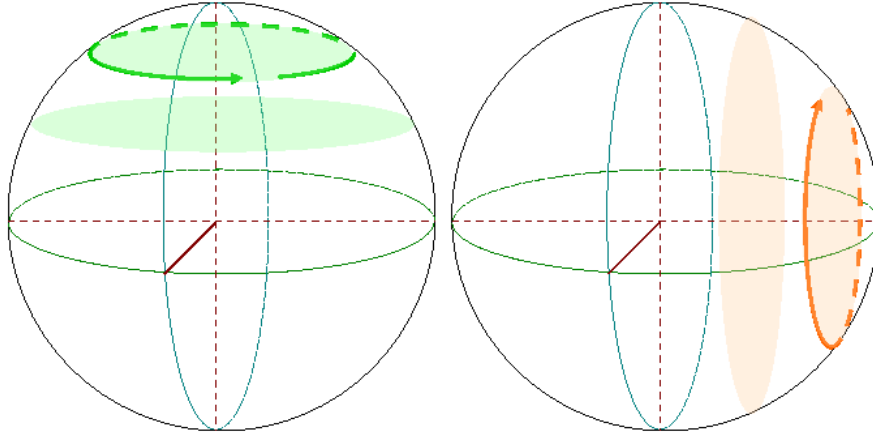


Figura 15 - Representação dos eixos de rotação efetuados pelo controlador de polarização de LiNbO₃.

O controlador de polarização de niobato de lítio utilizado tem seu funcionamento regido pelas equações (3.1). Tais relações, entre as tensões que alimentam o controlador, foram implementadas eletronicamente através de somadores e inversores, em circuitos anteriores ao amplificador de saída, por motivos como reduzir o número de portas utilizadas do controlador principal bem como o número de conversores digital/analógico, simplificar o algoritmo de controle, aumentando assim o desempenho e a velocidade do processamento.

$$\begin{aligned}
 V_A &= 2V_0 \cdot \delta \cdot \sin(\alpha) - V_\pi \cdot \delta \cdot \cos(\alpha) + V_{A,Bias} \\
 V_B &= 0 \text{ (Ground)} \\
 V_C &= 2V_0 \cdot \delta \cdot \sin(\alpha) + V_\pi \cdot \delta \cdot \cos(\alpha) + V_{C,Bias}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

V_π é a tensão necessária para provocar uma diferença de fase de 180° entre os modos TE e TM. V_0 é a tensão necessária para girar TE para direção de TM ou vice-versa. $V_{A,Bias}$ e $V_{C,Bias}$ são as tensões de ajuste (bias), necessárias para que se encontre o zero de birrefringência entre os modos TE e TM. δ é o atraso desejado em comprimento de onda (ou fração) e α é o ângulo de orientação da lâmina.

3.2. A plataforma de controle

A primeira versão compacta do sistema utilizou uma plataforma de hardware, PC-104, que é um microcomputador PC, padrão industrial, em dimensões reduzidas, uma placa de conversão analógico/digital (A/D) e uma de conversão digital/analógica (D/A). O sinal de realimentação do sistema chega até a placa A/D, onde é convertido em digital e encaminhado ao microcomputador, que processa esta informação com o algoritmo de controle, que coloca o valor de tensão de atuação, calculado no circuito analógico através da placa D/A. Atualmente, as placas D/A padrão PC-104 possuem canais de 100.000 amostras por segundo (100KS/s) que é um fator limitante.

Uma nova versão, baseada em uma plataforma controlada por um FPGA (*Field Programmable Gate Array*), foi desenvolvida com a maior parte dos circuitos eletrônicos projetados e montados no próprio CETUC. O circuito de processamento do FPGA pode ser reprogramado através de uma porta USB (*Universal Serial Bus*), assim como a frequência de operação da placa.

A plataforma possui também circuitos de conversão A/D e D/A, especialmente desenvolvidos para esta finalidade. O circuito de conversão A/D trabalha a uma velocidade superior a 40.000.000 de amostras por segundo (40MS/s), que, considerando o critério de Nyquist, pode operar a uma frequência de 20MHz. No caso do circuito D/A a taxa de operação pode alcançar a 10MS/s ou 5MHz. Na figura 16, podemos observar o diagrama da parte central da plataforma de controle. Apenas um A/D é necessário para a aquisição do sinal, porém, oito circuitos D/A foram utilizados para gerar as tensões para o controlador de polarização principal e no caso do compensador de PMD mais quatro D/As são utilizados para alinhar as linhas de atraso que são compostas por secções de fibra Hi-Bi.

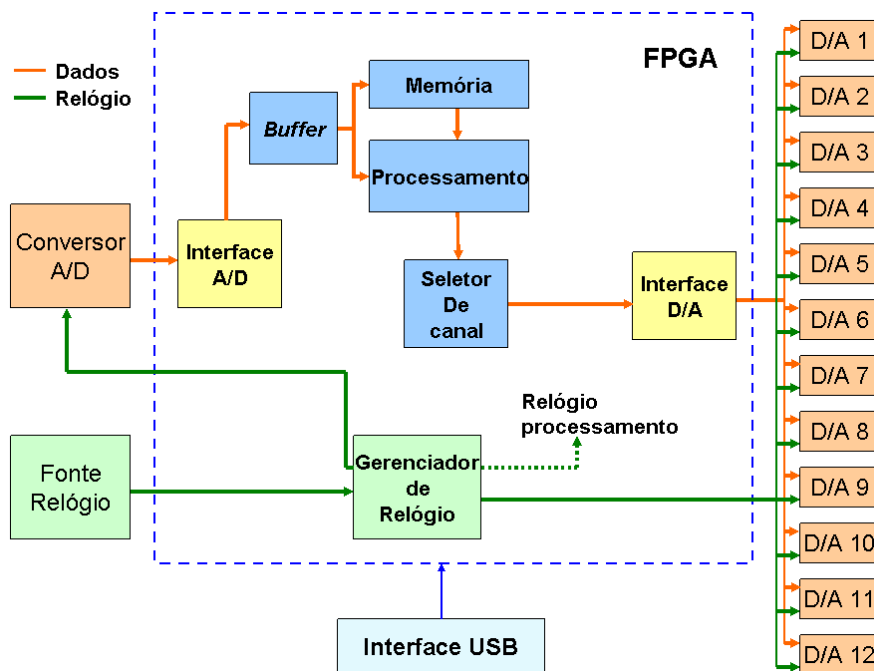


Figura 16 – Diagrama da plataforma de controle baseada em FPGA.

3.3. Os sinais de realimentação

Os sinais de realimentação são totalmente diferentes para as aplicações do controle total de polarização e do compensador de PMD. Em relação ao controle de polarização apenas um fotodetector seguido de um amplificador de sinal de banda passante compatível com a velocidade do restante do sistema é utilizado, no caso para o sistema com o FPGA, um conjunto de fotodetector com amplificador com banda passante maior que 20MHz, é o mais recomendado devido às características de resposta do sistema.

Para o compensador de PMD, foi utilizada uma amostra do próprio sinal de RF a ser compensado. Um fotodetector com banda passante de 50GHz foi utilizado para a detecção do sinal de amostra. Devido às características diferentes dos formatos de modulação RZ e NRZ, um amplificador de RF com banda passante entre 18GHz e 43GHz foi escolhido, pois assim o mesmo poderia ter um desempenho adequado nos dois formatos, uma vez que o espectro de frequência para tais formatos são bem diferentes. De qualquer forma, tal amplificador, privilegia a região do espectro de RF mais sensível às flutuações devido aos

efeitos da PMD. Um detector de sinal de RF foi utilizado para transformar a amplitude do sinal de RF em um nível contínuo de tensão, o qual é proporcional ao desvanecimento do sinal de RF devido a PMD. Amplificadores de sinal como os utilizados no sistema de controle de polarização com banda passante de 20MHz foram utilizados a fim de ajustar o nível de tensão adequados para aquisição do sinal pelos conversores analógico/digital.

3.4. Os *drivers* de tensão

Normalmente, tanto os controladores de polarização, baseados em piezoelétricos, quanto os de niobato de lítio necessitam que sejam aplicadas tensões elevadas em seus terminais para que o dispositivo funcione adequadamente.

No caso no controlador utilizado, é necessária uma diferença de potencial de aproximadamente 45 volts entre os terminais do dispositivo, porém, como nosso objetivo é operar à maior velocidade possível, tivemos que desenvolver um circuito eletrônico, com características muito singulares, para o funcionamento do mesmo. Uma delas é a tensão de saída de 45V, o que implica não só em um produto de ganho e banda passante alto, já que o sinal gerado pelo controle é de até 3,3 volts, mas também em uma alta taxa de variação de tensão (*Slew Rate*) e uma varredura de tensão de 40V na saída, o que não é encontrado em amplificadores operacionais comuns, e os poucos componentes, encontrados com tais características, são relativamente caros e grandes, o que gera um custo adicional e um desenho desproporcional em relação à eletrônica de controle, já que, são necessários 12 circuitos de driver.

Devido a todas essas restrições, optamos por utilizar circuitos amplificadores, utilizados em *drivers* de tubos de raios catódicos, com algumas adaptações especiais. A resposta senoidal máxima encontrada para esse circuito foi de 5MHz.

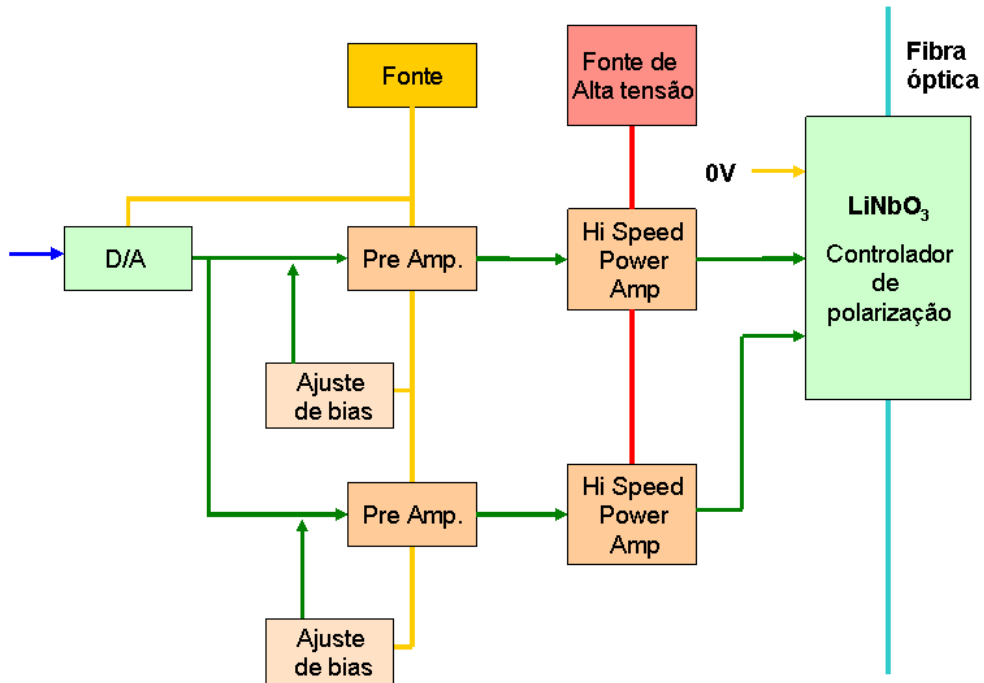


Figura 17 - Diagrama de blocos simplificado do esquema de amplificação do sinal para acionamento do controlador de polarização.

Cabe ressaltar que certos cuidados especiais, com o projeto dos *drivers*, devem ser tomados. O controlador de polarização de LiNbO_3 possui uma impedância extremamente alta em seus terminais de entrada, onde qualquer corrente mínima, nestes terminais, é suficiente para alterar o estado de polarização da luz, o que pode resultar em pequenas modulações na polarização. Proteções contra interferências externas e cuidados com a supressão de ruídos da alimentação e de outras partes do sistema foram observados.

3.5. Preparo do bit quântico

Para que a comunicação quântica seja realizada com codificação em polarização, é necessária a modulação de quatro estados de polarização distintos, cada um associado a um qbit, como ilustrado na figura 18.

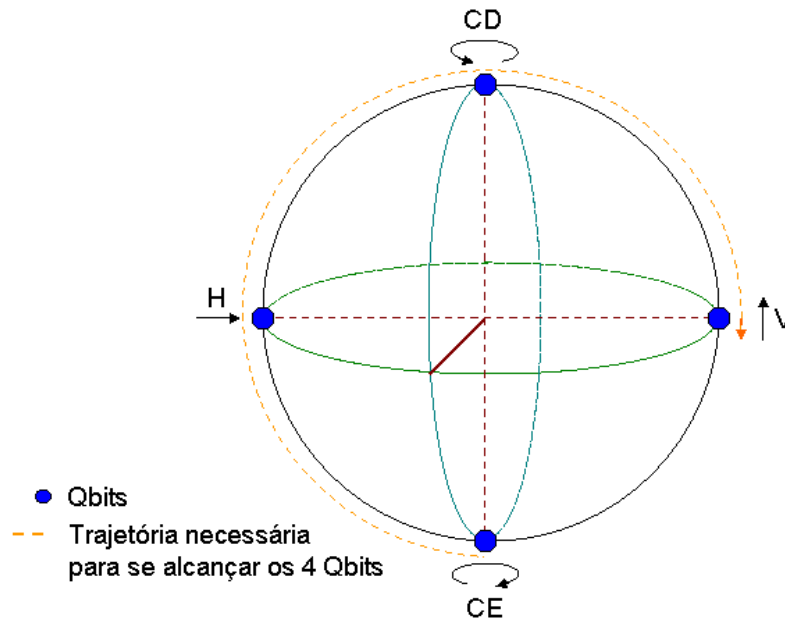


Figura 18 - Representação dos qubits na esfera de Poincaré e do caminho utilizado pelo controlador de polarização de $\frac{3}{4}$ da esfera para fazer a modulação dos quatro qubits.

Esta modulação do bit quântico também é realizada através de um controlador de polarização de LiNbO_3 , porém a eletrônica utilizada para acionar este controlador tem características diferentes do apresentado anteriormente.

O *driver* utilizado nesta configuração necessita de uma amplitude de saída bem menor, pois como este controlador de polarização será dedicado a apenas a modulação do canal quântico, temos, então, a oportunidade de utilizar todos os atuadores na mesma direção, assim, podemos somar suas excursões na esfera, ou seja, podemos aplicar 10V no primeiro estágio do controlador, 10V no segundo e assim por diante até que se consiga a excursão dos $\frac{3}{4}$ de arco da esfera necessários para representar todos os qubits. Desde que seja incluído o ajuste de *bias* para cada elemento.

No entanto, este controlador de polarização deverá operar a uma frequência muito superior a do controle, não sendo obrigatoriamente necessária uma resposta DC. Assim foram utilizados outros circuitos de acionamento. No caso, um *driver*, com três canais, tensão de saída de 70V e tempo de subida de 9ns foi utilizado.

3.6. O algoritmo de controle

O algoritmo de controle é parte fundamental e crítica para o desempenho do sistema. No caso da nova plataforma baseada em FPGA, algumas variáveis adicionais, como o relógio do sistema e o sincronismo do mesmo com os circuitos externos de conversão A/D e D/A, devem ser consideradas com atenção, pois o “algoritmo” usado não descreve só o procedimento de processamento, mas também o todo o circuito eletrônico que é sintetizado dentro do FPGA.

Dado que o controlador de polarização tem elementos de atuação que proporcionam uma rotação finita na polarização, talvez um dos pontos de maior dificuldade seja evitar que todos esses atuadores se encontrem em um ponto onde seja impossível prosseguir naquela direção e sentido [7, 21], fazendo com que o sistema não consiga evitar a penalidade ou tenha que sofrer um rearranjo (*reset*) dos atuadores para que isso não aconteça.

Isso é desastroso para sistemas de transmissão onde uma falha de poucos microssegundos, que é o tempo de rearranjo do sistema de controle, pode ser crítica.

Para que tal situação seja evitada ao máximo, um novo procedimento foi implementado no algoritmo, entre outros. Considerando que a polarização da luz e a DGD da fibra variam dinâmica e aleatoriamente é razoável a intuição que temos que o SOP, pouco provavelmente permanecerá rodando em torno de um eixo em um mesmo ângulo e sentido diversas vezes consecutivas. Assim, podemos concluir intuitivamente que uma situação crítica, que pode induzir o sistema a colocar os atuadores em uma situação limite, neste momento, pode ser totalmente favorável em um momento posterior.

Diante da possibilidade de utilizar essa aleatoriedade a nosso favor, um algoritmo de diferentes camadas de atuação foi implementado, fazendo com que o sistema atue o menor tempo possível e deixando, sempre que possível, os atuadores parados a fim de que a aleatoriedade das rotações da polarização ou do vetor PMD não sejam seguidos, mas sim, tenham sua direção alterada sempre que necessário para que o sistema opere da melhor forma possível.

A figura 19 ilustra a atuação deste algoritmo de histerese. Vamos supor três faixas de valores aqui representadas pelas regiões vermelha, amarela (ou escape) e verde (ou retorno). Na região em verde, o sistema se encontrará sempre em estado de repouso, apenas adquirindo os dados da realimentação para comparação. Na região em amarelo, o sistema também se encontra em repouso, desde que, o valor da intensidade atinja esta região através da área verde, ou seja, o sistema estava com intensidade ideal e foi diminuindo.

Quando a intensidade atinge a região vermelha, o sistema começa a atuar elevando o nível da intensidade do sinal e entra em repouso somente quando voltar à região verde. Este tipo de procedimento confere ao sistema uma melhora significativa na estabilidade quando a intensidade do sinal está em torno do ótimo, fazendo com que o sistema não derive com o tempo.

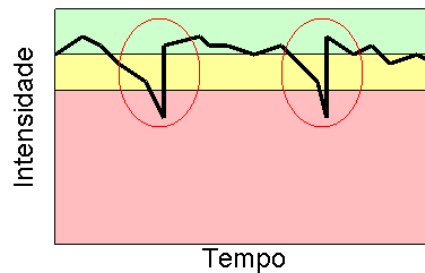


Figura 19 - Ilustração das regiões de intensidades programadas para o algoritmo de histerese.

No caso de um sistema de controle de polarização, podemos observar na figura 20 a ilustração das regiões da esfera programadas para o algoritmo de histerese, onde a região de escape só pode ser atingida sem o acionamento do sistema, saindo do raio da região de retorno. Caso a polarização se encontre além da borda da região de escape, o sistema estará sempre tentando levar a polarização de volta para um ponto na região de retorno, atravessando diretamente a região de escape.

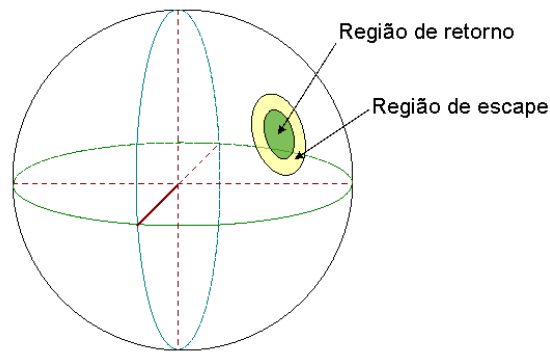


Figura 20 - Ilustração das regiões da esfera programadas para o algoritmo de histerese.

Um segundo aspecto, que muitas vezes é responsável por falhas nas transmissões, principalmente quando o sistema era utilizado como compensador de PMD, é o tamanho do passo utilizado para o ajuste da polarização. Imaginava-se que o passo dado pelo atuador deveria ser maior quanto mais longe a intensidade estivesse do seu valor ideal. Com isso, uma situação crítica acontecia com frequência quando o sistema já estava com um valor do sinal de realimentação muito baixo e o sistema atuava para a direção errada. Assim, mesmo que por um instante de tempo muito breve com duração de poucos microssegundos, o sistema de transmissão poderia elevar sua taxa de erros a patamares não aceitos pelos sistemas de correção de erro, causando, assim, uma rajada de bits errados.

Esta condição de dimensionamento de passos foi reconsiderada, fazendo uma relação entre a intensidade máxima (ou ideal) e a distância entre intensidade momentânea. Assim, quanto mais longe do ideal a intensidade estiver menor deve ser o passo para que o sistema seja pouco afetado, pois o erro é maior quanto mais longe a polarização estiver do alvo. Em oposição, quando a intensidade estiver próxima à região aceita como ideal, o passo deve ser maior. Porém, por motivos óbvios, bem menor do que o raio da região ideal, para o que sistema não se torne instável.

No caso com controle de polarização, é fácil perceber que, quando a polarização a ser controlada está longe da ideal, a sua derivada é maior, fazendo, assim, com que pequenos ângulos de rotação projetem uma perda maior. Ao contrário, quando o sistema está com a polarização próxima ao alinhamento, a

projeção é menor, assim, um passo maior é necessário para “sensibilizar” o sistema.