

4 Resultados Experimentais em controle da polarização

4.1. Controle da birrefringência do canal quântico

Para determinar a velocidade máxima de geração dos qbits, através da modulação da birrefringência do canal quântico, o esquema da figura 21 foi montado. É um experimento simples no qual a luz polarizada de um laser com potência fixa sofre uma rotação na polarização, refletindo na potência detectada após um polarizador fixo. Até o momento, o principal obstáculo foi a resposta de frequência do *driver*, que exige ainda uma taxa de variação de tensão em sua saída bastante alta e uniforme em toda a banda passante.

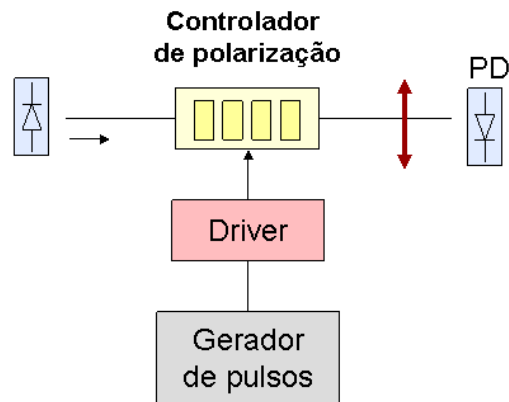


Figura 21 - Montagem para medição da velocidade de chaveamento de polarização.

A frequência de resposta encontrada para um pulso de polarização ortogonal ao estado inicial foi de 20MHz, (figura 22). O que é maior do que a taxa que podemos obter na transmissão devido à velocidade de operação dos detectores de fótons únicos atualmente disponíveis. Podemos observar que, para a mudança do estado de polarização inicial para um estado ortogonal, sem o retorno imediato

para o estado inicial, o tempo de chaveamento é de 12ns, considerando a definição de tempo de subida entre 10% e 90%.

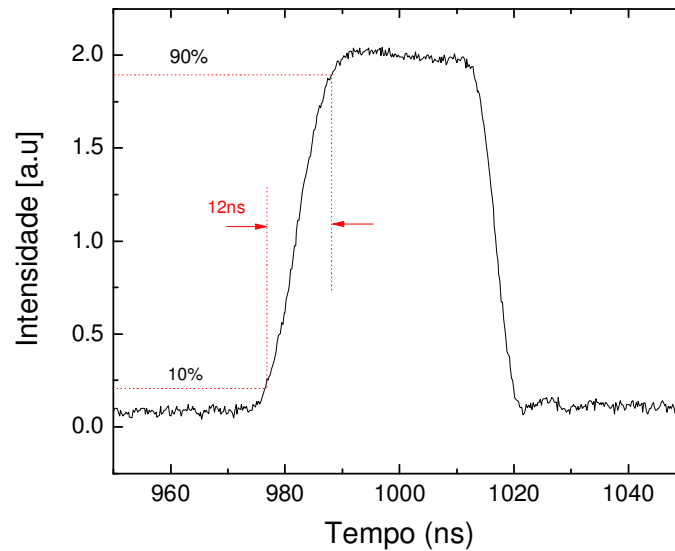


Figura 22 - Pulso de luz no canal quântico com polarização determinada pelo bit de polarização.

Na figura 23, podemos observar o pulso de luz no canal quântico sincronizado dentro da janela de modulação da birrefringência do canal. Pode-se notar que a variação da polarização é mínima durante toda a duração do pulso, podendo ser negligenciada.

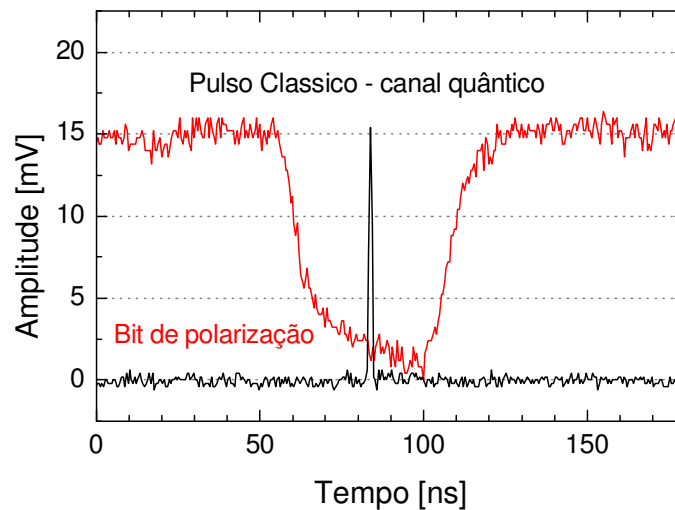


Figura 23 - Pulso de luz no canal quântico com polarização determinada pela modulação da birrefringência.

4.2. Velocidade do sistema com controle de um SOP

Para obtermos a velocidade de resposta do sistema como seguidor de polarização, dois protótipos foram testados com a montagem da figura 25. O primeiro protótipo possuía controladores de polarização com banda de 40KHz, conversão A/D de 500KHz, D/A 100KHz e era controlado por uma plataforma PC-104. O segundo protótipo dispunha de uma plataforma baseada em FPGA, conversor A/D de 20MHz e um controlador de polarização de LiNbO₃ com velocidade de atuação limitada pelos circuitos D/A de 5MHz. Todavia como o sistema de aquisição necessita de várias amostras para fazer as médias, ambos sistemas de controle sofrem uma redução em suas velocidades de atuação de acordo com o número de médias implementado.

Para ilustrar a variação da polarização que um sinal óptico pode sofrer em uma fibra exposta ao ambiente, foi realizada a medida da evolução da polarização provocada por uma mudança abrupta em um dos anéis de um controlador de polarização tipo orelha de Mickey. A figura 24 mostra a evolução da polarização que ocorreu em um intervalo de tempo de 0,7s.

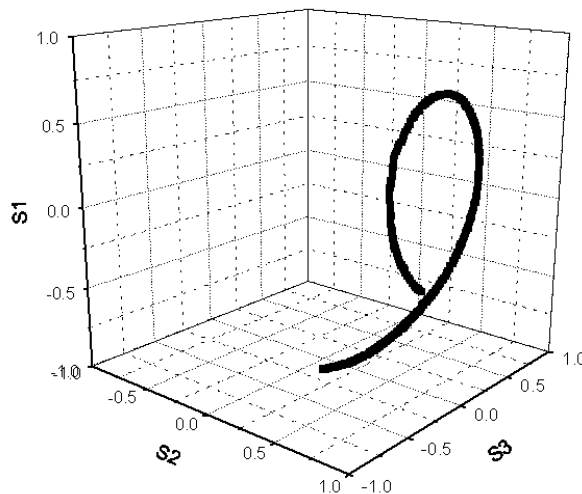


Figura 24 – Evolução da polarização provocada por uma variação abrupta no controlador de polarização em 0,7s.

Para demonstrar a eficácia do sistema de controle em relação a uma variação extrema e instantânea de polarização, um sinal, tipo degrau, é ajustado no gerador de função, e na polarização de saída do modulador, de forma a simular

esta variação brusca na polarização. A polarização de entrada no polarizador foi ajustada de forma que este pulso fornecido promovesse uma excursão de aproximadamente meia volta na esfera, onde a potência óptica no fotodetector variasse entre a máxima e pelo menos 30% da máxima.

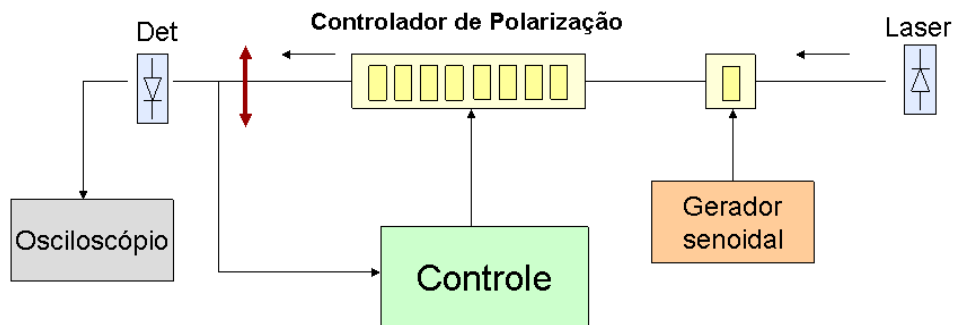


Figura 25 – Diagrama da montagem do experimento para a medição da velocidade de estabilização da polarização e da capacidade de estabilização em relação à velocidade de rotação da polarização.

Na figura 26, podemos observar o resultado deste ensaio para o primeiro protótipo e na figura 27, o resultado para o segundo protótipo. Podemos notar uma melhora significativa de desempenho. Mesmo pior, o primeiro protótipo teve um desempenho adequado para a demonstração do sistema de controle aplicado a distribuição de chaves quânticas, como veremos posteriormente.

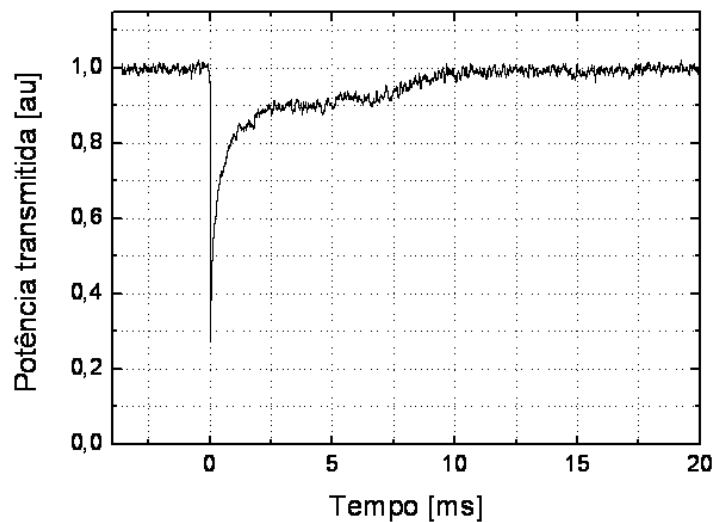


Figura 26 – Tempo de resposta para a estabilização do sistema para o protótipo N.1.

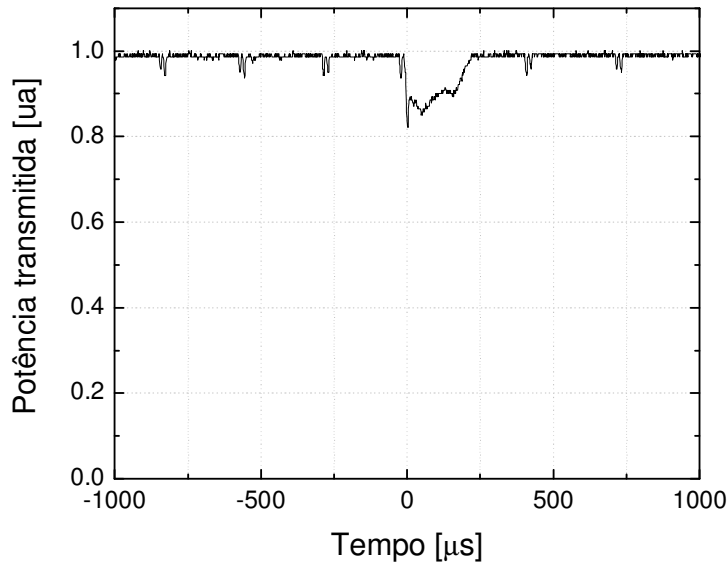


Figura 27 - Tempo de resposta para a estabilização do sistema para o protótipo N.2.

No experimento com o segundo protótipo, podemos observar que o tempo de atuação do sistema é da ordem de grandeza do pulso aplicado, não conseguindo o rotador girar a polarização para o caso de perda abaixo de 30%.

Em um segundo momento, foi feita a avaliação do sistema de controle em relação à variação contínua da polarização. Assim, um sinal senoidal ajustado no gerador de funções do esquema, ilustrado na figura 25, de forma que a princípio, a polarização percorresse uma volta completa na esfera de Poincaré. Com o sistema de controle ligado, a frequência do sinal aplicado ao rotador foi sendo aumentada, resultando na resposta mostrada na figura 28.

Os pontos representam o valor médio do sinal detectado pelo fotodetector e as barras vermelhas o desvio padrão do sinal detectado, que fisicamente são os picos de variação. Podemos observar na figura 28, que o sistema suporta variações contínuas de até aproximadamente 20Hz, para manter um valor mínimo (média menos desvio padrão) em um patamar de 95% do sinal máximo, ou seja, 5% de perda máxima. Para esse mesmo ponto, a perda média é de 1,8%, o que é absolutamente tolerável para a transmissão de bits quânticos.

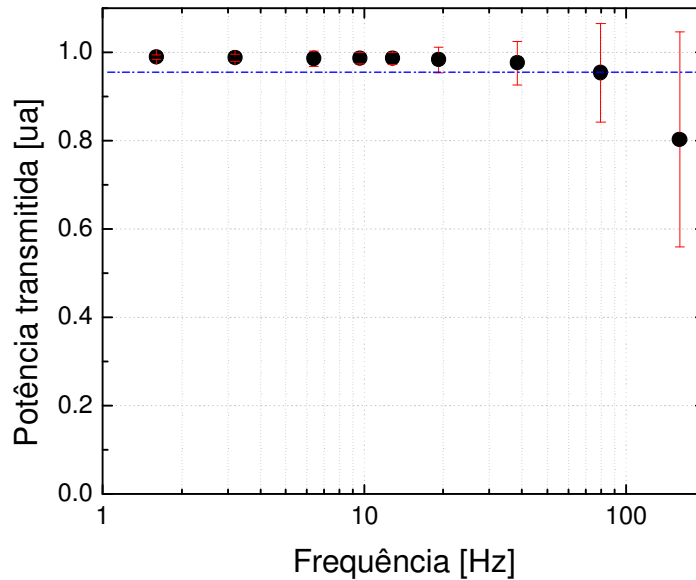


Figura 28 – Gráfico da capacidade de estabilização traduzido pela potência transmitida em relação à frequência de rotação da polarização.

4.3.

Controle de todos os SOPs em um canal quântico por canais laterais

Os primeiros resultados experimentais do controle total da polarização, ou controle de todos os estados de polarização, para a transmissão de bits quânticos através de fótons únicos, foram realizados ainda com o primeiro protótipo descrito no capítulo anterior.

Foram utilizados dois controladores de polarização alinhados com os eixos de polarização R_1 , R_3 e os polarizadores P_1 e P_3 (fig. 29), de forma que uma vez que a polarização fosse ajustada no canal em λ_1 , esta não se alterasse por rotações realizadas por R_3 . Assim, cada controlador de polarização corrigia a polarização segundo a alteração de intensidade em cada uma das referências isoladamente. Os sinais de referência foram transmitidos em canais laterais ao canal quântico, acoplados na fibra através de um DWDM com separação de 0,8 nm. Podemos avaliar a eficácia desse esquema de transmissão com as medições de penalidade de potência, que pode ser interpretada como taxa de erro de bits quânticos ($QBER_{opt}$), onde um detector sensível a polarização é utilizado para receber os sinais de referência.

Os sinais de controle foram lançados pelo lado do Bob, contra-propagante ao canal quântico, limitando, assim, a interferência dos canais laterais ao espalhamento Rayleigh da luz. Um segundo filtro foi utilizado para reduzir ainda mais a diafonia (ou *crosstalk*) para abaixo do nível de escuro do detector de fótons únicos no canal em λ_2 . Esse filtro é composto de um circulador e uma rede de Bragg, que para simplificar o diagrama está representado como um único filtro (F). Após o enlace de fibra de 8,5Km e 0,54ps de PMD, do lado da Alice do link, e após os sinais de controle terem atravessado todos os controladores de polarização, eles foram retirados pela porta 3 de um circulador óptico e separados por um segundo DWDM.

Finalmente, os canais em λ_1 e λ_3 foram detectados nos fotodiodos PD₁ e PD₃ depois de passarem pelos polarizadores correspondentes (P₁ e P₃) que estão por sua vez alinhados através de controladores de polarização, tipo “orelha de Mickey”, com os eixos de R₁ e R₃, de forma que a polarização que é ajustada no canal em λ_1 seja invariante para rotações realizadas por R₃.

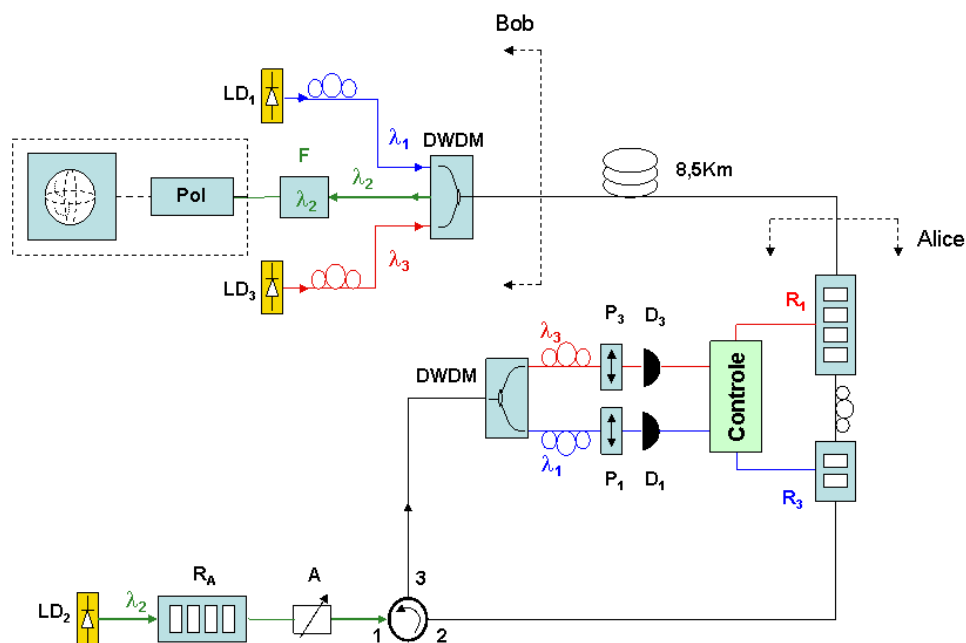


Figura 29 - Ilustração da montagem do sistema de controle de polarização aplicado a transmissão de bit quântico no regime de polarização.

Um controle eficiente foi realizado mesmo com um baixo nível de potência óptica como -20 dBm nos canais de controle. O sinal do canal quântico foi lançado pelo lado da Alice após um controlador de polarização (RA) e um atenuador variável (A), de modo que as medições de polarização pudessem ser feitas quer com um canal clássico colocando um polarímetro na extremidade do Bob ou por contagem de fótons únicos com um controlador de polarização, seguido por um polarizador linear e um contador de fótons gatilhado.

O polarizador P_B do canal quântico tem 40 dB rejeição, enquanto que os polarizadores dos canais de controle tem 30 dB de razão de extinção. As medições de contagem de fótons foram realizadas com 0,2 fótons por 2,5 ns de janela de pulso, em uma taxa de 100 kHz.

A Figura 30 mostra a evolução da polarização de saída do canal 2 na esfera de Poincaré, com e sem o sistema de controle de polarização, ao longo de 2 horas durante as quais a PMD da fibra foi forçada a evoluir, alterando a temperatura da fibra. Obviamente, um canal quântico baseado em polarização não seria viável em um enlace de fibra sem controle, e essa é a razão pela qual a codificação em polarização é tão difícil de ser implementada. Quando o sistema de controle de polarização é ligado, a estabilização dos dois estados não-ortogonais fica evidente (30b).

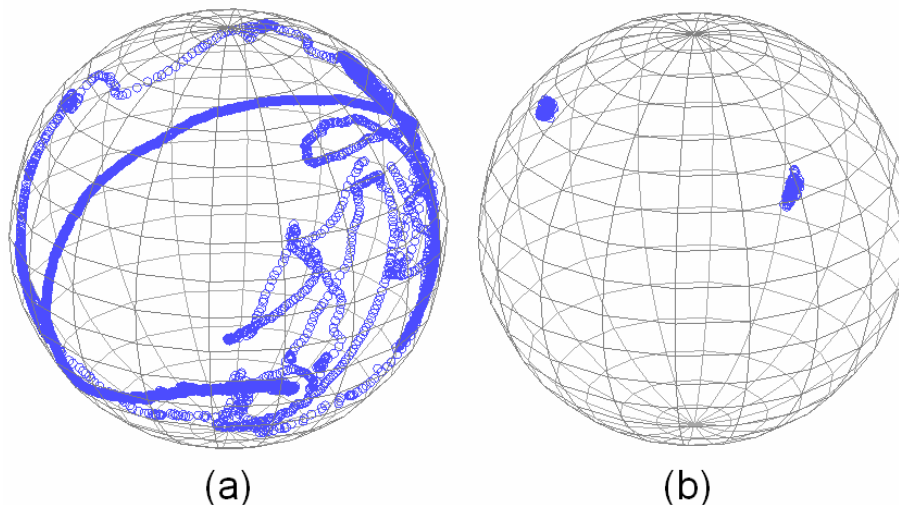


Figura 30 (a e b) - Medidas da evolução da polarização na esfera de Poincaré com o sistema de controle de polarização desligado (a) e ligado (b).

Considerando-se os valores utilizados no experimento, a eq.2.21 nos mostra que $\tau \Delta\omega \sim 0.3$ não é um valor tão pequeno a ponto de se negligenciar. No entanto, o desempenho do experimento é evidente, o que significa que a eq. 2.20 parece demasiadamente restritiva. Na verdade, foi deduzida considerando o cenário mais pessimista, pois na verdade a eq. (2.21) pode possuir mais de uma solução. Assim, é possível que o algoritmo de controle encontre melhores soluções no caso geral, relaxando de alguma forma a condição prevista na eq. 2.22.

Uma melhor avaliação da eficácia do sistema de controle pode ser observada na figura 31(a), que apresenta a distribuição estatística do desvio angular na esfera de Poincaré entre a polarização vigente e a polarização desejada. Podemos observar que todos os desvios angulares são menores que 10° , com uma média de apenas 2° . Isso significa que o pior caso adiciona uma atenuação menor que $\cos^2(5^\circ) \sim 0.8\%$, neste experimento.

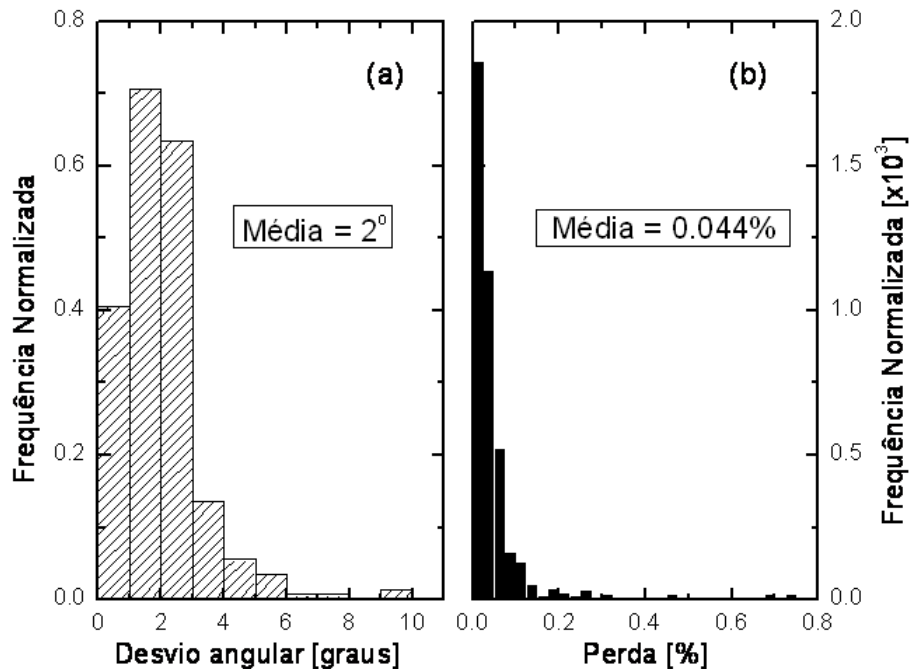


Figura 31 - (a) Distribuição estatística do desvio angular na esfera de Poincaré entre a polarização momentânea e a polarização desejada. (b) Distribuição estatística $QBER_{opt}$ adicionada pelo sistema de controle de polarização devido ao defasamento entre o SOP controlado e o SOP alvo durante o experimento.

A Fig. 31(b) exibe a distribuição estatística da perda de potência adicionada pelo sistema de controle de polarização devido ao defasamento entre o SOP controlado e o SOP alvo durante o experimento. Evidentemente, esta distribuição depende da evolução temporal da função de transferência da fibra óptica e pode ser degradada em caso de severas vibrações na fibra. Contudo, considerando o tempo de resposta do sistema, e também, o fato que a perda do canal é dada pelo cosseno ao quadrado da metade do desvio angular na esfera de Poincaré, a precisão do nosso sistema de controle de polarização deixa uma margem suficiente para negligenciar a sensibilidade da maioria dos sistemas de detecção em comunicações quânticas e é plenamente compatível com a QBER óptica aceitável em comunicações quânticas, que é usualmente ao redor de 1%.

Para demonstrar que o nosso sistema de controle de polarização é capaz de funcionar no regime de fótons únicos, sem problemas de inserção de ruído dos canais laterais de controle no canal quântico que poderia elevar a QBER óptica para níveis não aceitáveis, e a fim de avaliar o isolamento entre os canais quântico e de controle, ajustamos a potência óptica lançada nos canais de controle para +5dBm cada, o que é muito maior que o mínimo necessário para um controle eficiente. Nesta condição, ainda observamos que o *crosstalk* era menor que as contagens de escuro do detector fótons únicos que tem uma probabilidade de contagens de escuro de 4×10^{-5} por nanosegundo.

A figura 32 mostra as contagens de fótons em Bob para dois estados fixos de polarização (linear 0° e 45°) na Alice que podem corresponder aos bits nas duas bases não-ortogonais do protocolo BB84, por exemplo [23]. Em cada caso Bob usa um controlador de polarização para mudar o ângulo do polarizador ao longo do equador da esfera de Poincaré.

Pode ser visto que, quando o polarizador de Bob é ortogonal ao estado enviado por Alice, a contagem total de ruído é composta inteiramente das contagens de escuro do contador de fótons. Isto significa que todas as outras fontes de ruído são pequenas o suficiente para se negligenciar, o que demonstra a viabilidade da configuração proposta.

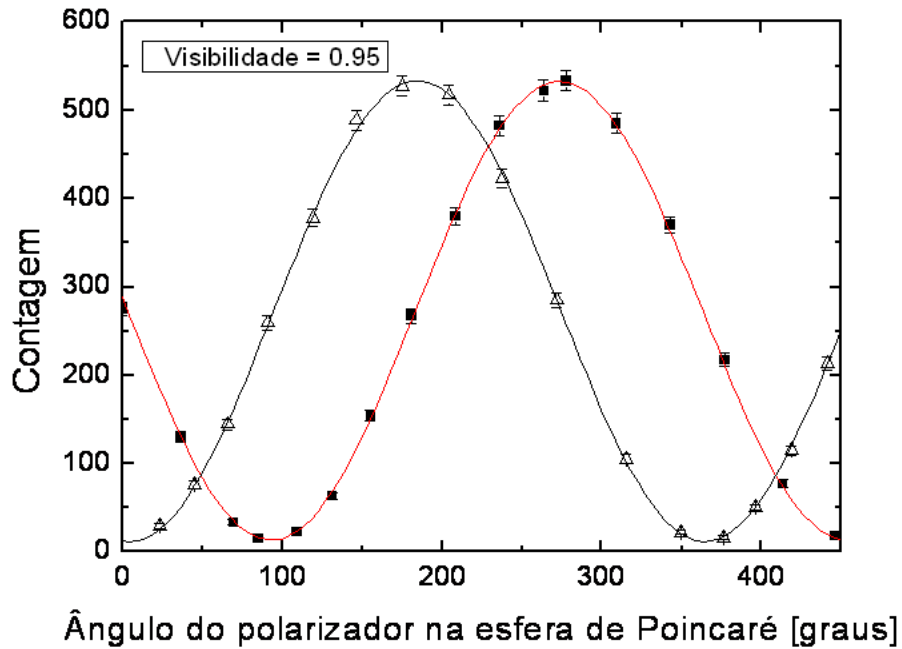


Figura 32 - Contagem de fótons para os estados de polarização fixos em Alice de 0° (triângulos) e 45° (quadrados).

Para avaliarmos a estabilidade deste sistema, foi realizada uma medição com duração de 10 horas consecutivas e variação da temperatura da fibra, a fim de forçarmos a evolução temporal da PMD. Uma polarização arbitrária foi escolhida como alvo para ser mantida estável pelo sistema de controle de polarização. A QBER adicionada foi mantida abaixo de 1% durante 90% do tempo como pode ser observado na figura 33, com uma penalidade média de 0,47%, que é um valor aceitável para os sistemas de distribuição quântica de chaves.

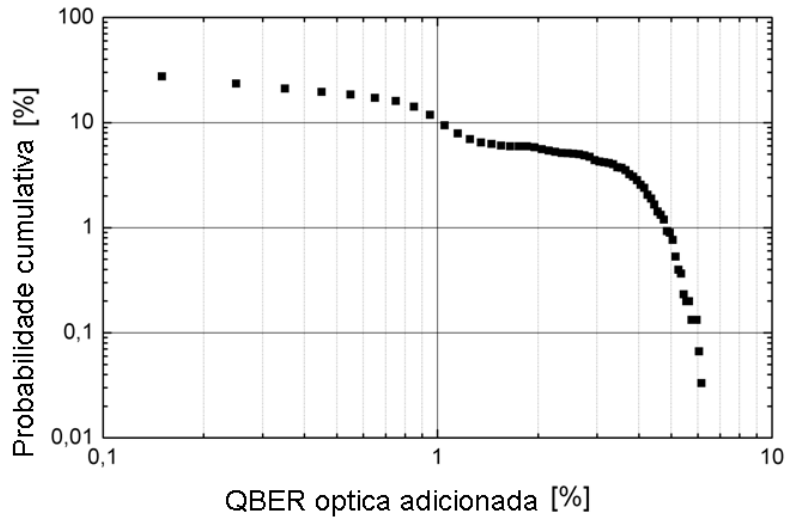


Figura 33 – QBER óptica adicionada ao longo de 10 horas de experimento.

Assim, através destes primeiros experimentos demonstramos a viabilidade de se transmitir bits quânticos no regime de polarização, graças ao sistema de controle de polarização desenvolvido e observando as características necessárias de rejeição do WDM.

4.4. Transmissão de bits quânticos codificados em polarização

Em um segundo experimento, com a plataforma de controle testada, foi realizada a transmissão de bits quânticos codificados em polarização conforme montagem ilustrada na figura 34.

Dois canais clássicos de controle com comprimentos de onda de $\lambda_1 = 1545,32$ nm e $\lambda_3 = 1546,92$ nm, nas janelas padrão de DWDM padrão, foram utilizados. O canal quântico utiliza um laser DFB atenuado, centrado em λ_2 ou $\lambda_Q = 1546,12$ nm. Todos os três canais co-propagantes são multiplexados no lado da Alice, utilizando um DWDM comercial com 1,4dB de perda de inserção e uma razão de extinção de no mínimo 35dB entre canais adjacentes e 45dB entre não adjacentes. Cada canal lateral possui ainda um circulador com uma rede de Bragg como filtro, centrado em λ_Q para remover qualquer sinal de ASE, gerado a partir

dos respectivos lasers, que geram ruído no contador de fótons em Bob, tornando a distribuição de chaves impraticável.

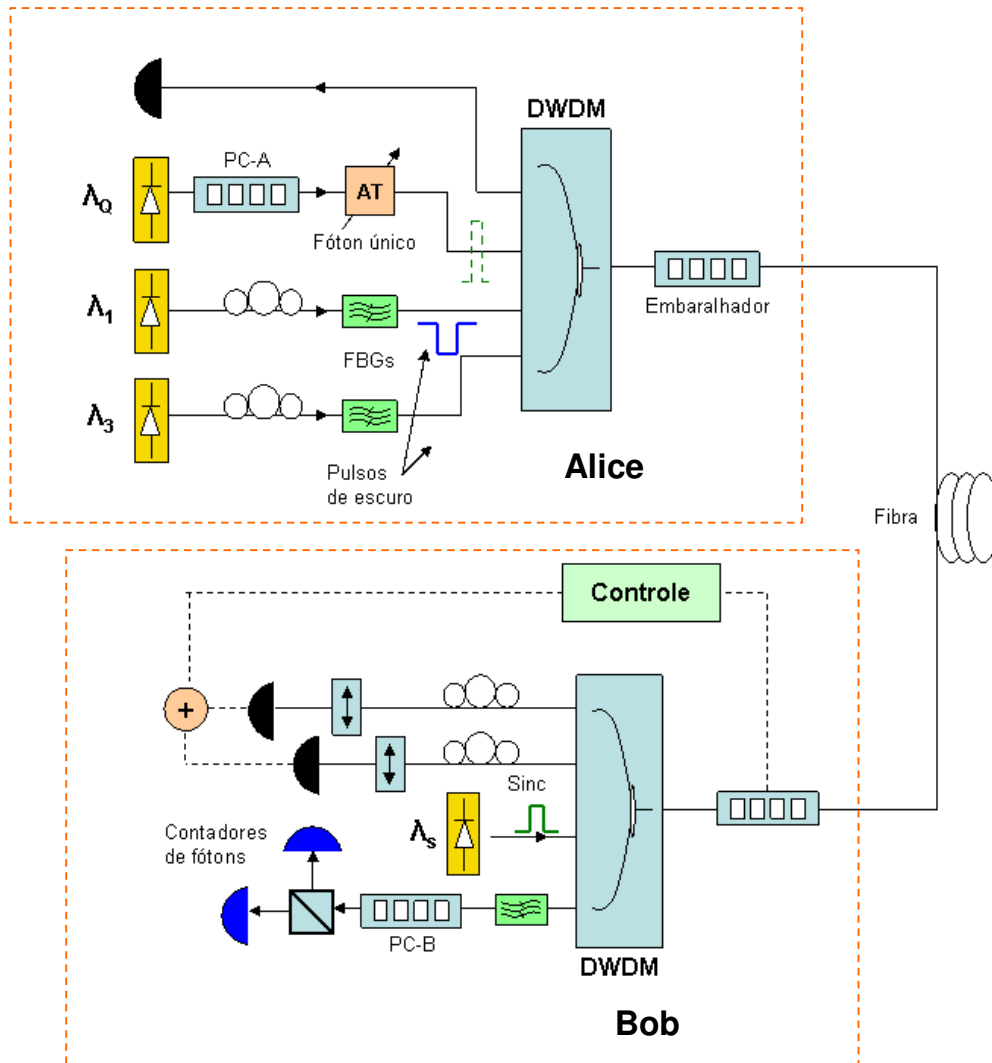


Figura 34 – Diagrama do experimento de transmissão de bits quânticos codificados em polarização em um enlace com polarização estabilizada.

Para uma avaliação inicial da estabilidade e eficiência, o sistema foi conectado a um enlace de fibra em um cabo flexível que se encontrava suspenso no topo de um edifício, sujeito a frequentes oscilações causadas pelo vento. Substituindo o PBS (*Polarisation Beamsplitter*) e os detectores de fóton único por um polarímetro foi possível obtermos as medidas abaixo (figura 35) que mostra claramente o desempenho do sistema.

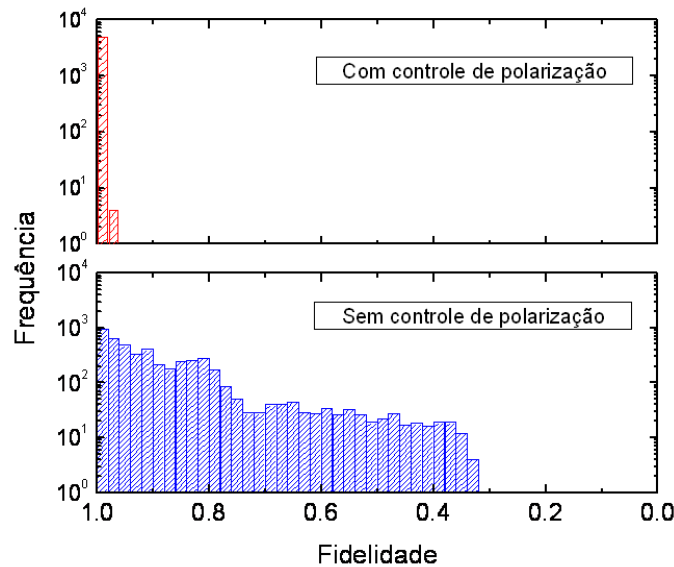


Figura 35 – Fidelidade entre os estados de polarização enviados por Alice e recebidos por Bob.

O nosso sistema de controle de polarização foi projetado para trabalhar com os canais de referência em modo CW. No entanto, o espalhamento Raman espontâneo também pode gerar ruído no canal quântico [28]. Para evitar esse problema, quando o sinal quântico é enviado o laser de cada canal tem sua potência reduzida para menos que -90dBm através de modulação de corrente por um período de 13,5ns. Essa modulação é transparente para o sistema de controle devido a um filtro passa-baixa na eletrônica de detecção, não afetando assim o desempenho geral do sistema. Através desse método, podemos garantir um controle contínuo sem degradar o desempenho da transmissão dos qbits.

Para os experimentos apresentados aqui foi utilizada a mesma eletrônica utilizada nos sistemas *plug-and-play* utilizados na codificação de fase por Stucki D. *et al*, [29], porém adaptada para a codificação em polarização. Nesta versão do sistema de controle de polarização uma grande inovação foi acrescentada. Apenas um controlador de polarização é utilizado, tendo a rotação definida a partir do processamento de apenas um sinal de realimentação que é a soma elétrica dos sinais ópticos alinhados à 45° entre si. Uma simulação foi feita para verificar a possibilidade de que a soma destes sinais não possua um máximo local, e, como pode ser visto na figura 36, apenas uma região de máximo, ilustrada em vermelho, é verificada quando se faz a soma das projeções dos canais a 0° e 45° .

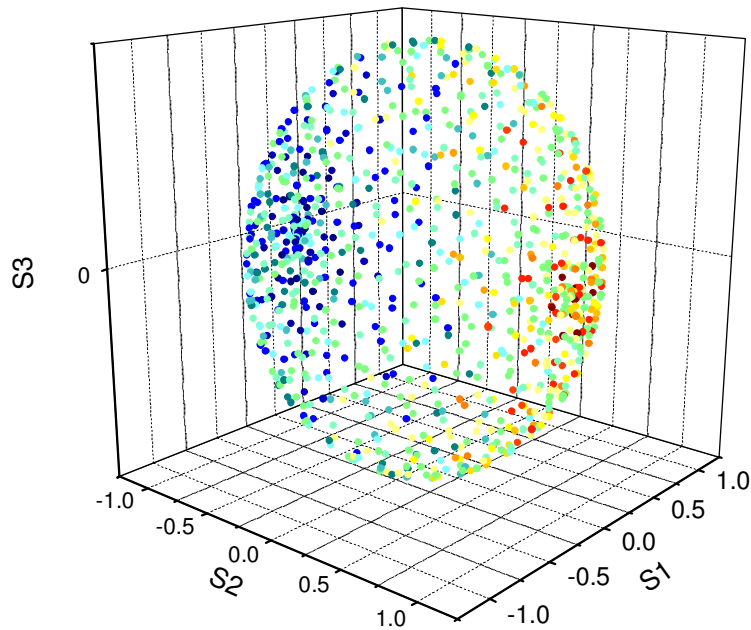


Figura 36 – Simulação da soma das projeções dos canais de referência alinhados a 45° entre si.

Esta simulação é o cálculo da potência óptica, para a polarização em cada ponto da esfera, dada pela equação:

$$I = \text{sen}^2(\theta) + \text{sen}^2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (4.1)$$

que é a soma das projeções das intensidades dos sinais quando estão alinhados a 0° e 45° com um polarizador imediatamente antes do fotodetector. Outros picos de máximos também são encontrados, obviamente, pois a função é periódica, no entanto tais pontos são representados pelos mesmos lugares na esfera.

O SOP relativo à modulação do bit quântico é gerada por um controlador de polarização de LiNbO3 conforme descrito no capítulo 3. O sinal elétrico para modulação é gerado a partir de um FPGA do sistema de transmissão. Este controlador comuta entre os quatro SOP necessários ao protocolo BB84 [23, 30]. Para a ligação entre a Alice e Bob foi empregado um carretel de 16 km de fibra óptica SMF-28 com 4,3dB de perda e 0,28ps de PMD. Antes do enlace de fibra foi acrescentado um embaralhador de polarização, de três secções com atuadores

piezoelétricos, para demonstrar a eficácia do sistema em presença de variações bruscas e contínuas na polarização. Após o enlace, o sistema de controle de polarização é colocado e sua saída conectada diretamente ao demultiplexador DWDM semelhante ao utilizado do lado da Alice. Para diminuir o ruído por *crosstalk* um segundo DWDM foi colocado em série como um filtro passa banda aumentando ainda mais a razão de extinção do canal quântico em relação aos canais laterais. Um conjunto com atuadores de LiNbO_3 e seu *driver* (capítulo 3) é usado por Bob para executar a escolha de bases. Finalmente um PBS é colocado antes dos respectivos contadores de fótons.

Após o alinhamento, todo o sistema foi testado, para isso medições foram feitas com o sistema de estabilização instalado, porém não ativo, assim, como o misturador de polarização também desativado. Do lado da Alice a potência óptica foi atenuada para se obter uma média de 0,1 fóton por pulso e a potência do laser no canal lateral era de -7,4 dBm cada. O experimento mostrou uma visibilidade de 97,2%, correspondendo a uma QBER óptica mínima de 1,4% e a QBER total medida foi de 1,6%. Com o sistema de estabilização ativo a QBER aumentou de 1,1% atingindo 2,7%. Isto pode ser atribuído ao aumento na QBER óptica devido a flutuações de polarização, induzida pelo algoritmo de controle.

A caracterização do desempenho do sistema de estabilização de polarização foi feita utilizando o misturador de polarização. Uma rampa de tensão foi aplicada a cada piezoelétrico que por sua vez induzia uma rotação da polarização de 2π para ambas as direções na esfera de Poincaré em uma frequência ajustável. Assim, uma frequência de 1Hz significa uma rotação de polarização 4π por segundo. Convém notar que essas flutuações de polarização extremas raramente são esperadas em ambientes normais.

Na figura 37, são mostradas as medidas da QBER óptica em diferentes frequências. Cada ponto tem, em média, 50 medições, com um milhão de fótons enviados pela Alice por medição. Os resultados mostram que a QBER óptica permanece abaixo de 6% para velocidades até $16\pi/s$. Aumentando a velocidade para $40\pi/s$ a QBER óptica tem uma média de 7,5%. Este resultado não é surpreendente, se observarmos as medições e resultados do experimento descrito na secção 4.2 (figura 28) onde analisamos o desempenho do sistema de controle para um SOP.

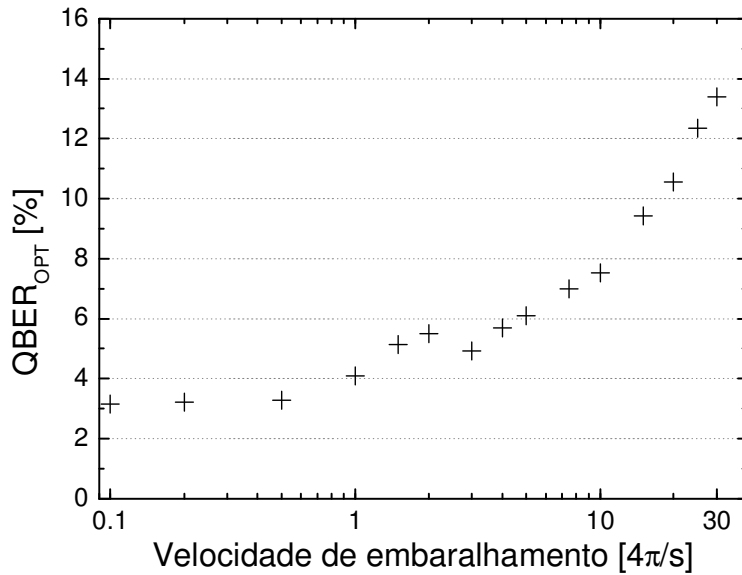


Figura 37 – QBER óptica em relação a velocidade de rotação da polarização - Medição realizada por N. Walenta

Para demonstrar a viabilidade da aplicação do sistema de estabilização em QKD (Quantum Key Distribution) sob condições aleatórias de mudanças de polarização, que ocorrem em fibras aéreas ou sob mudanças térmicas e mecânicas, o embaralhador de polarização de piezoelétricos foi substituído por um controlador de polarização manual. Infelizmente, um problema com a eletrônica do modulador de polarização em Bob (PC-B) reduziu a razão de extinção da modulação durante uma troca de chaves de 5MHz. Isso nos obrigou a simular uma troca de chaves aleatórias, medindo os qbits em Bob em uma base fixa e posteriormente repetindo o procedimento em uma base a 45° . Na figura 38, as medições, nas duas, bases são mostradas em preto para a primeira base e vermelho para a segunda base em situações com o estabilizador de polarização ligado e desligado, assim, como o embaralhador de polarização. O problema com o modulador de polarização do Bob e erros de alinhamento são razões prováveis para o ligeiro aumento da QBER durante a demonstração de troca de chaves. Ainda assim, a figura 38 mostra a eficácia do sistema de estabilização, quando o estado de polarização é aleatoriamente embaralhado na ordem de poucos rad / s. Novamente, cada ponto representa uma troca de chaves de um milhão qbits enviados. Na primeira seção mostrada na figura 38(a) as chaves são distribuídas

com o sistema de estabilização ligado, mas sem correr qualquer alteração na polarização. Na segunda seção, figura 38(b), a QBER média aumenta em apenas 1,2% durante a troca de chaves, embora os estados de polarização estejam sendo continuamente e aleatoriamente embaralhados.

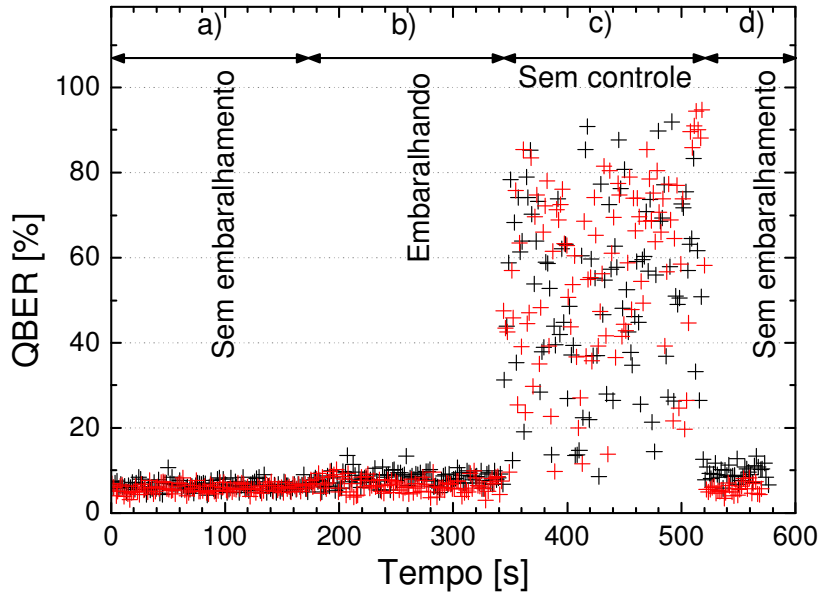


Figura 38 - QBER do sistema de transmissão de qbits, (a) estabilização ativa e embaralhador desativo, (b) estabilização ativa e embaralhador ativo, (c) estabilização desativa e embaralhador ativo e (d) estabilizador reativado e embaralhador ativo. Os pontos em preto e vermelho diferenciam QBER nas bases 0° e 45° – Medições realizadas por N. Walenta.

Para comparação, quando o sistema de estabilização é desligado a QBER aumenta dramaticamente para uma média de aproximadamente 50% (figura 38(c)) situação na qual ficaria impossível fazer qualquer distribuição quântica. A última seção, (figura 38(d)), revela que o sistema de controle é capaz de voltar a se estabilizar imediatamente quando é reativado.

4.5. Controle de todos os SOPs no canal central pela média dos SOPs dos canais vizinhos

Até agora, controlamos o canal central através do controle dos SOPs dos canais vizinhos isoladamente, ou seja, utilizamos apenas um SOP de cada comprimento de onda como realimentação do controle. No caso de uma fibra com PMD elevada a descorrelação entre os canais vai se tornando um problema, pois a referência dada pelo canal vizinho vai representando cada vez menos o comportamento do canal a ser controlado. Para a aproximação de primeira ordem vamos chamar o canal central de ω_2 , escrevendo as transformações dos canais laterais como:

$$T(\omega_2 - \Delta\omega) \text{ e } T(\omega_2 + \Delta\omega). \quad (4.2)$$

Expandindo temos:

$$T(\omega_2 \pm \Delta\omega) = T(\omega_2) \pm \frac{\partial T}{\partial \omega} \cdot \Delta\omega + \frac{\partial^2 T}{\partial \omega^2} \cdot \Delta\omega^2 \pm O(\Delta\omega^3) \quad (4.3)$$

Onde podemos observar que o canal central é controlado com o termo de primeira ordem, dominante, $\partial\theta = \Delta\omega \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega}$ com uma perda média de:

$$\left\langle \sin^2\left(\frac{\partial\theta}{2}\right) \right\rangle \propto (\tau \cdot \Delta\omega)^2 \quad (4.4)$$

É razoável e intuitivo que a média entre os dois SOPs dos canais laterais pode ter uma relação mais forte com o canal central. Escrevendo a matriz de transformação como essa média temos:

$$T(\omega_2) = \frac{T(\omega_1) + T(\omega_3)}{2}; \quad (4.5)$$

e

$$T(\omega_2) = \frac{T(\omega_2 - \Delta\omega) + T(\omega_2 + \Delta\omega)}{2}; \quad (4.6)$$

substituindo 4.5 em 4.3 temos:

$$\frac{T(\omega_2 - \Delta\omega) + T(\omega_2 + \Delta\omega)}{2} = T(\omega_2) + \frac{\partial^2 T}{\partial \omega^2} \cdot \Delta\omega^2 \quad (4.7)$$

onde os termos ímpares se cancelam tendo o termo de segunda ordem como dominante. Podemos observar que para o cálculo da perda média temos uma

$$\text{dependência de quarta potência } \left\langle \sin^4\left(\frac{\partial\theta}{2}\right) \right\rangle \propto (\tau \cdot \Delta\omega)^4. \quad (4.8)$$

Para a comprovação desta teoria, foi realizado o controle da polarização do canal central com a média dos dois SOPs dos canais laterais conforme a montagem ilustrada na figura 39.

Quatro Lasers foram utilizados para os canais laterais. Cada par de comprimentos de onda foi modulado a uma frequência diferente do outro par e ajustado em um SOP com 45° de diferença entre os pares, afim de que fosse possível separar os sinais de cada par do outro lado do enlace. Os polarizadores P₁ e P₃ estão alinhados a 0° e 45°, correspondendo ao alinhamento de cada par. Os detectores D₁ e D₃ recebem a projeção da soma das projeções das intensidades dos sinais ficando a cargo do filtro eletrônico a separação dos pares. Em seguida, as amplitudes dos sinais são convertidas em sinais contínuos e somadas. Esse método nos proporciona um sinal de realimentação balanceado com a média de um SOP (por exemplo, vertical) vindo de λ₁ e λ₃ e um SOP a 45° também vindo do mesmo par de comprimentos de onda.

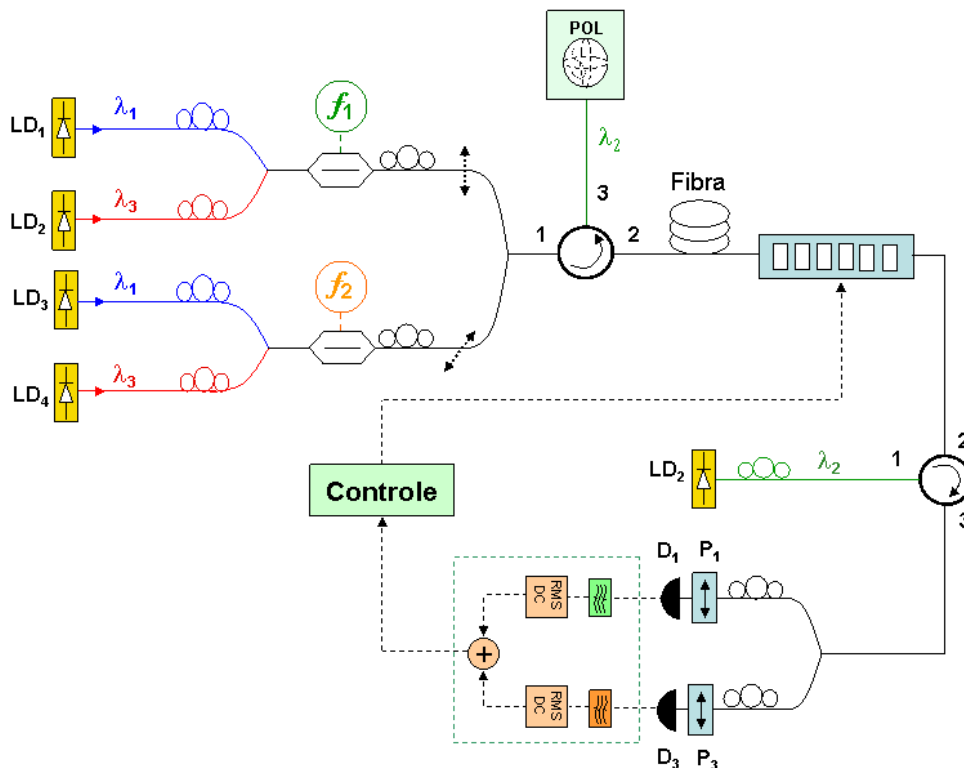


Figura 39 – Diagrama do experimento de controle total da polarização do sinal em um canal central pelas médias dos SOPs de em canais vizinhos.

O canal de comprimento de onda λ_2 , a ser controlado, é adicionado ao enlace através de um circulator óptico na recepção e extraído por outro, direcionando o sinal para um polarímetro de alta taxa de amostragem para a aquisição dos dados.

Ligando e desligando os Lasers, podemos fazer uma combinação de controle, utilizando a média dos SOPs dos canais como referência, ou um par de comprimentos de onda com SOPs distintos, similarmente ao esquema utilizado nas seções 4.3 e 4.4. Como o modulador não é um dispositivo ideal, vários ajustes e cuidados devem ser tomados quando os comprimentos de onda são modificados, a fim de otimizar o sistema, como, por exemplo, o realinhamento dos quatro lasers com a entrada do modulador e o alinhamento dos SOPs após cada modulador. Os resultados a seguir, foram retirados do experimento feito com a montagem descrita e uma fibra de 1,25ps de PMD no enlace. A temperatura da fibra foi, exaustivamente, alterada através de um soprador térmico durante a

medição. O tempo de medição, para cada ponto, foi em torno de 40 minutos, com duas amostras por segundo, em média.

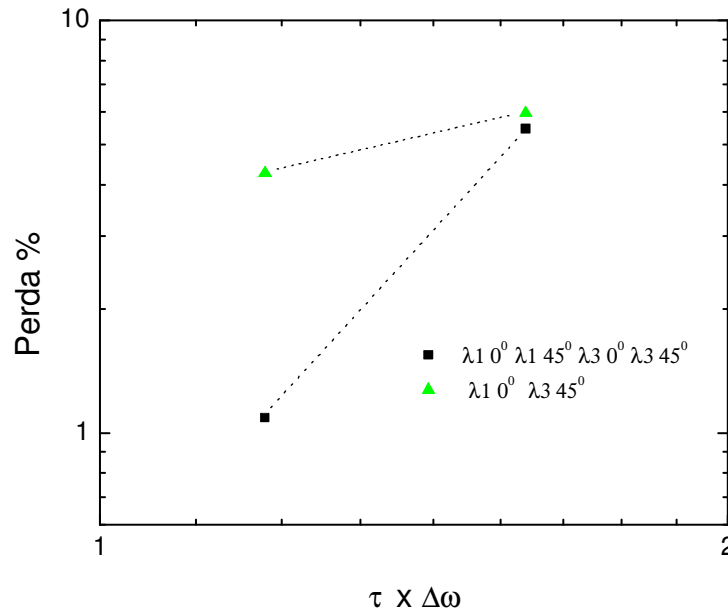


Figura 40 – Perda devido ao desalinhamento da polarização na transmissão de um sinal com polarização controlada com e sem a média dos SOPs dos sinais de canais vizinhos.

Como podemos observar na figura 40, o controle, sem a média real dos SOPs, segue a função $(\tau \cdot \Delta\omega)^{1,38}$, que em teoria deveria ser quadrática. Essa diferença pode ser atribuída ao número de amostras que pode ter sido insuficiente para alcançar situações mais críticas, onde a perda, relativa ao ponto $(\tau \cdot \Delta\omega) = 1,6$, pode ser maior.

Já nas medições com controle, a função segue aproximadamente a quarta potência como previsto. Detalhes teóricos podem ser observados nas equações 4.3 e 4.7 e simulações em [31]. Foram feitas medições em alguns pontos com $(\tau \cdot \Delta\omega) < 1$, porém estas medidas não foram consideradas para um ajuste de curva, pois tais pontos estão abaixo do nível do ruído mínimo que o sistema de controle adicionou à polarização do sinal em λ_2 .