

## 4 O Canal Óptico

A determinação da função de transferência de um dispositivo óptico com birrefringência pode ser feita através da análise espectral do sinal de RF. Este tipo de medida pode ser útil quando os métodos mais comuns de medida de PMD, como o método interferométrico [17] e o método de varredura do comprimento de onda [18], não têm escala suficiente (interferométrico – limitado pelo deslocamento dos elementos mecânicos) ou resolução (varredura em comprimento de onda – limitado à resolução espectral do analisador de espectro utilizado).

Estas situações ocorrem quando os valores de DGD medidos são muito elevados ou o dispositivo óptico tem uma faixa espectral muito estreita, como as redes de Bragg, por exemplo. Outros métodos de medida do DGD que também podem ser utilizados nestas situações são o método do desvio de fase [19] e o método polarimétrico [20].

Neste capítulo serão apresentadas medidas do DGD, através da determinação da função de transferência da fibra (emulador). Isto será feito com o objetivo de caracterizar o comportamento espectral da PMD visando avaliar o potencial do método de filtragem espectral, utilizados nos compensadores de PMD [21, 22], como sinal de realimentação, para determinar a correção na função de transferência do conjunto fibra + compensador.

Na seqüência será apresentado um mapa do DGD medido em um emulador de PMD em 4 comprimentos de onda da banda C, utilizando o método do desvio de fase [19], a fim de avaliar a evolução do DGD em função do comprimento de onda e em função do tempo.

A seguir, será apresentada uma análise de medidas de PMD realizadas em diversos cabos ópticos espalhados pelo Brasil, tentando retratar o universo de amostragem dos enlaces ópticos brasileiros. Nestas medidas diversos cabos de diferentes idades e fabricantes serão avaliados.

Em uma última etapa será apresentado um estudo realizado em redes de Bragg com *chirp*, utilizadas na compensação da dispersão cromática, onde

elevadas flutuações no atraso de grupo em função do comprimento de onda foram encontradas. Estas flutuações geram contribuições importantes para a PMD de 1ª e 2ª ordem. Duas técnicas de medida serão comparadas, o método do desvio de fase e o método polarimétrico. Os resultados obtidos nas medidas são comparados com as predições teóricas [23].

#### 4.1.

#### **A Função de Transferência dos Emuladores de PMD**

Com o objetivo de avaliar a limitação na faixa passante da fibra devido à distorção causada pela PMD no espectro do sinal de RF, foram realizadas medidas da faixa passante em 3 dispositivos de PMD, uma fibra HiBi muito longa e dois emuladores de PMD [42].

Estas medidas visavam avaliar a viabilidade da utilização da técnica de medida da faixa passante com o método de medida do DGD. Pois as variações do DGD se refletem diretamente na função de transferência dos emuladores (faixa passante). Ao longo do tempo, isto permitiria avaliar a sensibilidade do método de filtragem espectral como sinal de realimentação em compensadores de PMD, como será visto no compensador desenvolvido no capítulo 6.

Nas medidas foram utilizados um laser CW e um modulador externo, a fim de que a largura do espectro óptico fosse pequena quando comparada com as variações de DGD em função do comprimento de onda do dispositivo de PMD (caso dos emuladores). Um gerador RF com varredura ajustada de 10 KHz à 8 GHz foi ligado no modulador externo e sua varredura foi sincronizada com a varredura de um analisador de espectro elétrico.

Na medida da faixa passante da fibra HiBi a utilização de modulação externa não exerceria influência na medida, uma vez que a PMD de uma fibra HiBi é o próprio DGD, que neste caso independe do comprimento de onda. No caso de uma fibra comum ou um emulador a dependência do DGD em função do comprimento de onda acarretaria uma limitação adicional na faixa passante da fibra devido ao *chirp* da fonte óptica caso a modulação externa não fosse utilizada. Os efeitos de *chirp* alargam a linha do laser, provocando a interação deste alargamento com as variações do DGD em função do comprimento de onda

(PMD de 2ª ordem) o que comprometeria a medida, impossibilitando uma medida correta do efeito isolado da PMD de 1ª ordem na faixa passante da fibra.

Portanto, nos casos medidos, onde somente a modulação externa foi utilizada, lançando-se luz nos estados principais (PSPs) a propagação do sinal pode ser descrita como uma superposição de dois estados de polarização ortogonais propagando-se com velocidades de grupo diferentes. Sendo que a cada  $\pi$  rad de variação da fase da luz que se propaga entre cada modo temos um mínimo de intensidade devido à interferência em contra-fase dos modos. Com isso, a função de transferência do dispositivo com PMD será correspondente a uma senóide com período dado pelo inverso do DGD.

Na figura 34 é mostrada a medida da função de transferência de uma fibra HiBi, com 565 ps de DGD, para polarização de entrada linear 45°. A linha sólida descreve os dados da medida realizada e os dados pontilhados a função senoidal ajustada para a medida.

Na figura 35 é apresentada a função de transferência dos dois emuladores de PMD, um com 38 ps e outro com 100 ps, para polarizações de entrada lançadas no PSP lento ou rápido e para polarização de entrada à 45° em relação aos PSPs da fibra, que correspondem a melhor e a pior faixa passante, respectivamente.

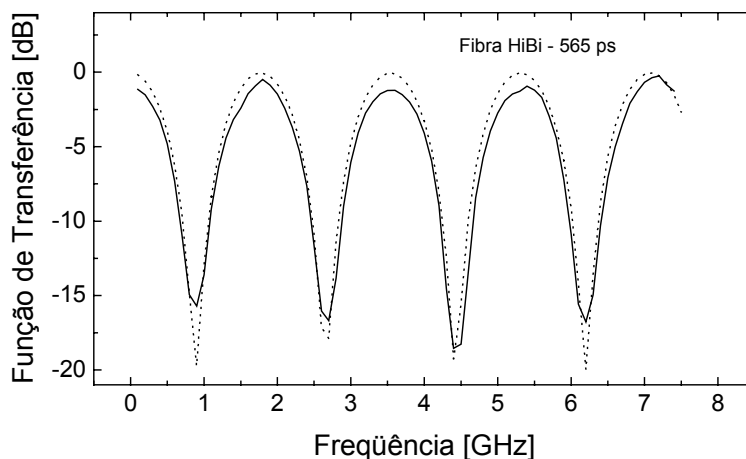


Figura 34 – Medida (linha) e cálculo (pontilhado) da função de transferência de uma fibra HiBi com 565 ps de DGD para uma polarização de entrada linear 45°.

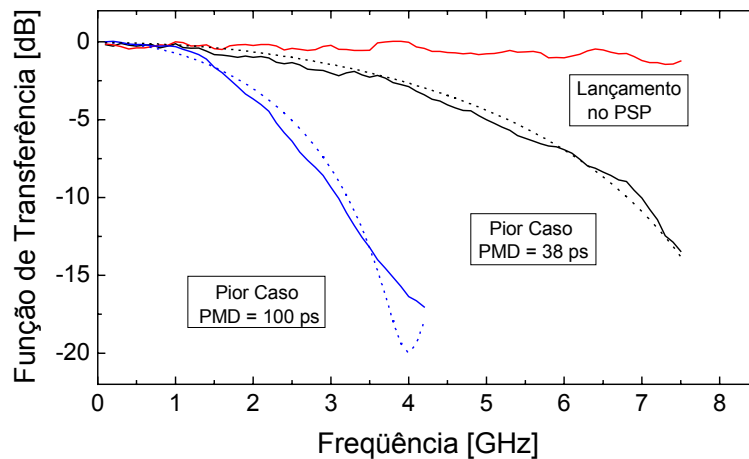


Figura 35 – Medida (linha) e cálculo (pontilhado) da função de transferência de dois emuladores de PMD (38 ps e 100 ps) para lançamento da polarização de entrada no PSP lento ou rápido (melhor caso) e para polarização de entrada à 45° (luz acoplada em ambos PSPs - pior caso).

Os ajustes encontrados para o valor da DGD em cada um dos emuladores foram os seguintes, no pior caso do emulador de 38 ps, obteve-se um valor máximo instantâneo de DGD de 59 ps e para o de 100 ps, obteve-se um valor máximo instantâneo de 125 ps. Para o emulador de 100 ps, o ajuste calculado não ficou tão bom quanto para o emulador de 38 ps, devido ao tempo de medida, aproximadamente 10 s para uma varredura completa do espectro, tempo que para o emulador de 100 ps era muito longo, fazendo com que, embora este estivesse isolado termicamente, sua condição variasse devido a flutuações térmicas na sala. No caso do emulador de 38 ps, as flutuações térmicas da sala eram menos importantes, devido aos comprimentos das seções de fibra que o compunham, sendo mais fácil manter a condição de pior caso durante a medida.

As medidas de faixa passante mostram que a filtragem espectral é um bom parâmetro de medida para detectar distorção de sinais por PMD. A filtragem espectral pode ser feita utilizando, por exemplo, dois filtros em diferentes frequências [21, 22] onde será medida a potência de RF do sinal. O compensador é ajustado a partir da otimização da potência nestas duas frequências. A escolha dessas frequências deve ser bem feita, uma vez que, se a PMD tiver um período da ordem da separação dos filtros, poder-se-á fazer uma péssima compensação. Esta

situação pode ser exemplificada no caso em que a função de transferência da fibra seja por exemplo a da figura 34 e os filtros estejam em  $1.7\text{ GHz}$  e  $3.4\text{ GHz}$  situação na qual a compensação ficaria comprometida.

Outra opção de filtragem espectral é a obtenção de um único sinal de realimentação retirado pela composição do sinal proveniente dos dois filtros [22]. Uma opção ainda mais simples é a utilização de um único filtro passa alta onde, ao invés de integrar-se à potência de RF em uma pequena faixa do espectro, caso dos filtros passa faixa, integra-se a região do espectro mais sensível aos efeitos da PMD, as frequências mais altas. A utilização do filtro passa alta possibilita um aumento na potência de RF detectada, o que melhora a relação sinal ruído.

#### 4.2. Medidas do DGD em Função do Tempo e do Comprimento de Onda

Outra medida realizada com o objetivo de avaliar o comportamento da PMD foi a de análise espectral do DGD em função do tempo em 4 comprimentos de onda.

O DGD de um emulador de 20 seções com PMD de  $38\text{ ps}$  foi medido em 4 comprimentos de onda diferentes utilizando o método do desvio de fase [19], como mostra a figura 36. Os 4 lasers foram conectados ao emulador através de uma chave óptica 4 X 1 e a um modulador externo de  $\text{LiNbO}_3$  modulado a  $1\text{ GHz}$ .

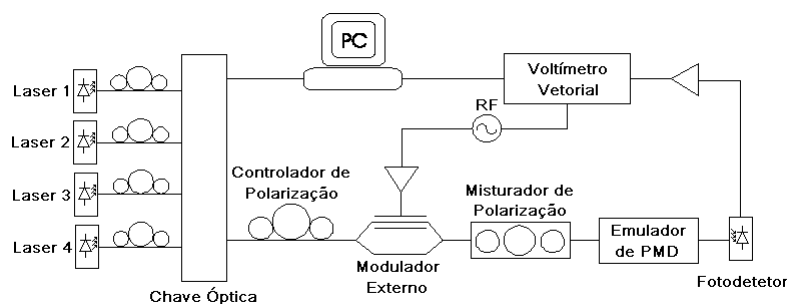


Figura 36 – Diagrama da montagem da medida do DGD em função do tempo para 4 comprimentos de onda utilizando o método do desvio de fase.

O voltímetro vetorial mede a diferença de fase gerada pela variação da polarização de entrada através do misturador de polarização durante  $30\text{ s}$  para cada um dos comprimentos de onda dos lasers. Durante este tempo o vetor

polarização de entrada varia aleatoriamente cobrindo a esfera de Poincaré, gerando uma estatística confiável do DGD.

Na figura 37 é apresentada a medida do DGD em função do tempo para os seguintes comprimentos de onda:  $1545.8 \text{ nm}$ ,  $1546.8 \text{ nm}$ ,  $1553.5 \text{ nm}$  e  $1557.2 \text{ nm}$ .

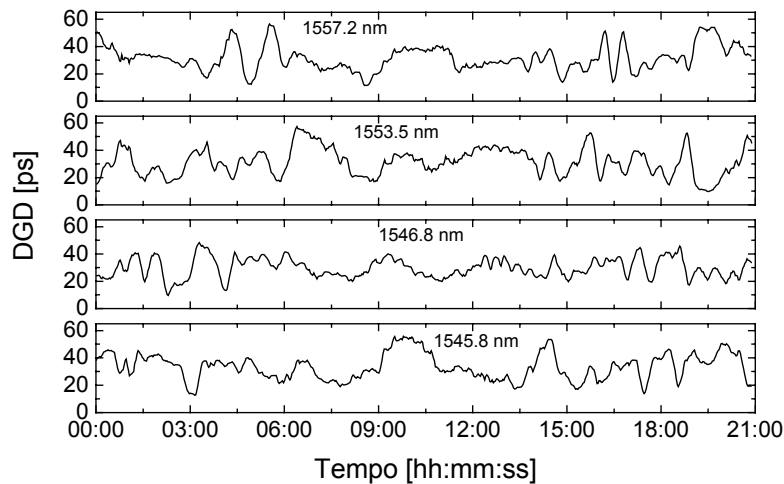


Figura 37 – Medida do DGD do emulador de 38 ps em função do tempo para 4 comprimentos de onda.

As flutuações do DGD obtidas durante as 21 horas de medida são mais rápidas que as observadas em [16], mas a PMD do emulador utilizado é 10 vezes maior do que a do trabalho citado, fazendo com que o decaimento da função de autocorrelação, neste caso, seja mais rápida. Embora as flutuações sejam mais rápidas também que as observadas em [24] para valores próximos de PMD, o que se deve provavelmente a diferença entre o comportamento térmico dos cabos instalados no campo e o comportamento de um emulador de PMD em uma sala. Uma menor massa e flutuações térmicas maiores na sala podem explicar as diferenças observadas.

Observa-se na figura 11 que mesmo os canais vizinhos separados de  $1 \text{ nm}$  estão descorrelacionados, ao contrário do apresentado nas medidas realizadas em [16, 24]. Esta descorrelação pode ser associada a flutuações de temperatura mais rápidas ou ainda ao número de seções utilizados no emuladores, comprovando que o emulador simula condições de funcionamento de uma fibra sob condições tão adversas quanto às encontradas em enlaces reais.

Na figura 38 é mostrada a distribuição estatística dos DGDs para os 4 comprimentos de onda medidos. Verifica-se que, embora em dois dos comprimentos de onda, a estatística de distribuição dos DGDs não tenha excursionado até valores tão elevados de DGD quanto os encontrados nas outras duas distribuições, o seu valor médio, que é a PMD, para todos os comprimentos de onda é precisamente o mesmo. Cabe salientar aqui que talvez um tempo maior de medida fosse necessário para que a incidência de situações menos prováveis fosse maior.

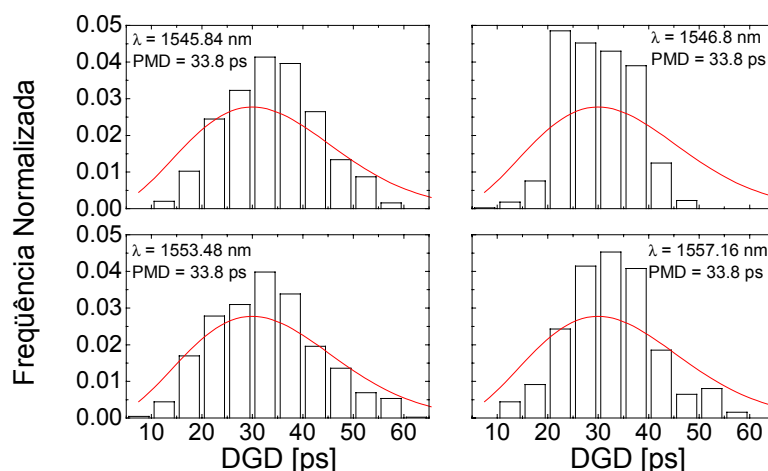


Figura 38 – Distribuição estatística do DGD medido em 4 comprimentos de onda.

### 4.3. Medidas de PMD em Cabos Instalados

Foram realizadas medidas de PMD em cabos instalados em vários enlaces de diferentes rotas. O comprimento médio das seções medidas foi de aproximadamente 100 km e ao total foram medidas aproximadamente 1200 fibras. Nestas medidas estão incluídos cabos velhos e cabos recentemente fabricados. A técnica de medida utilizada foi à medida interferométrica [17]. A estatística das medidas realizadas é apresentada na figura 39.

A maioria dos valores de PMD ficaram abaixo de 10 ps, 10 % do *bit slot* de um sistema de 10 Gb/s. Pode se notar que, embora 32 ps de PMD tenham sido medidos em um cabo de fibra antigo, as medidas de 9 ps e 13 ps de PMD foram encontradas em cabos recentemente fabricados/instalados.

Se um sistema de 40 Gb/s for considerado a tolerância permitida pelo ITU seria de 2,5 ps ao invés de 10 ps. Neste caso, 5 % das fibras medidas apresentariam PMD acima do valor de tolerância.

Na discussão acima as repetidoras foram consideradas a cada estação (distância de aproximadamente 100 km entre as estações), situação que difere da realidade, pois normalmente a distância entre repetidoras em sistema ópticos amplificados é de aproximadamente 400 km.

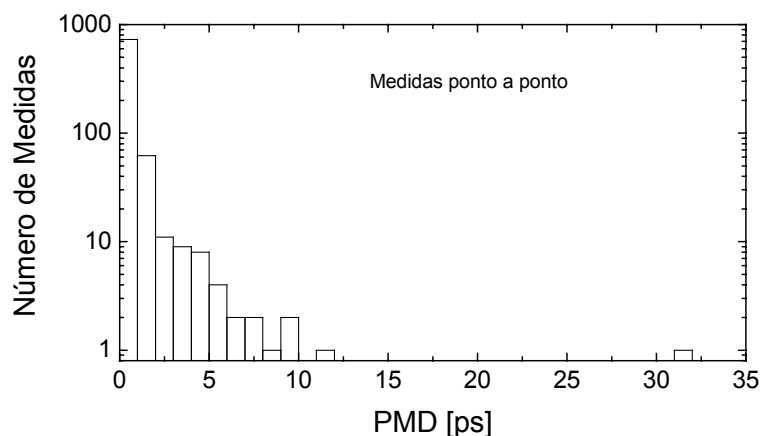


Figura 39 – Estatística das Medidas de PMD ponto a ponto em cabos de fibra óptica instalados.

Agrupando os cabos em seções de 400 km uma nova estatística foi obtida. Para isso calculou-se a PMD total de cada seção através da raiz quadrada da soma dos quadrados das PMDs de cada fibra [8], assumindo um acoplamento aleatório entre as seções de fibra. A estatística correspondente a esta situação é apresentada na figura 40.

Nesta situação de fibras agrupadas o número de seções de fibra fora do limite de 10 % do *bit slot*, estipulado pelo ITU-T aumenta, mas ainda é menor do que 2 % do número total de seções agrupadas para um sistema de 10 Gb/s. No caso de um sistema de 40 Gb/s o número de seções agrupadas que estão acima do limite é de 20 %, que pode ser considerado uma fração elevada no cálculo de um sistema a ser instalado.

A estatística apresentada aqui é incompleta, pois foi medido um número limitado de fibras nos cabos. A amostra, porém mistura cabos antigos e novos e portanto as medidas mostradas aqui não estão longe da realidade do conjunto de



cabos existentes no Brasil. É interessante ressaltar que os fabricantes dos cabos novos mediram suas fibras antes de entregá-los para a instalação. A comparação entre os resultados obtidos com os cabos instalados e os calculados pela concatenação das medidas realizadas nas fabricas mostram algumas discrepâncias com valores de PMD medidos acima ou abaixo do previsto. Os valores abaixo do previsto podem ser entendidos pelo fato de que o fabricante mede geralmente em cabos de 4 a 5 km onde os valores reais da PMD estão abaixo do valor limite do equipamento de medida. Os valores mais altos, porém, podem ser atribuídos a modificações que a fibra tenha sofrido durante o processo de instalação. Uma coisa que merece investigação é a ação do tempo sobre os cabos instalados, a fim de avaliar a PMD da fibra com o envelhecimento dos cabos. Com o tempo as birrefringências na fibra, podem mudar, devido a fatores como, por exemplo, a tensão mecânica sobre o cabo óptico, alterando as condições de birrefringência em alguns pontos do cabo, o que pode levar a mudanças na PMD.

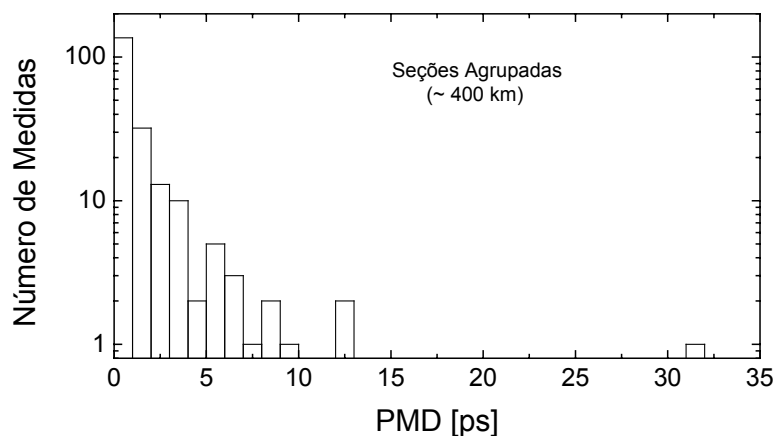


Figura 40 – Estatística das medidas de PMD das fibras agrupadas em seções de ~ 400 km.

#### 4.4.

#### Medidas Polarimétricas de PMD e Flutuações no Atraso Diferencial de Grupo em Redes de Bragg com Chirp

A crescente demanda por velocidade em sistemas ópticos de alta capacidade usando fibras ópticas do tipo padrão ITU-T G.652 torna necessário o uso de técnicas de compensação de dispersão cromática. As redes de Bragg com *chirp*

com coeficiente de dispersão negativo, são componentes promissores para a compensação de dispersão por ter um tamanho compacto [23]. Mas medidas mostram que estas podem apresentar valores elevados de PMD e perdas dependentes da polarização (PDL – *Polarization Dependent Loss*). A PMD tem se mostrado um importante fator em redes de compensação de dispersão [25-28], sendo que a birrefringência nessas redes se deve a dois fatores: a birrefringência intrínseca da fibra e a birrefringência induzida pelo processo de gravação da rede [23]. Em redes de Bragg ideais para as quais o atraso de grupo é uma função linear do comprimento de onda, o atraso diferencial de grupo (DGD) entre os dois modos de polarização, induzidos por uma birrefringência, é constante e proporcional à inclinação da curva de atraso de grupo [23]. Por outro lado, as flutuações no atraso de grupo em função do comprimento de onda em redes reais pode depender bastante do DGD e sua contribuição para a PMD (valor médio do DGD) pode não ser desprezível como mostrado em [26] e ter uma característica determinística [29].

As flutuações no atraso de grupo dão origem à PMD de 2ª ordem, a qual introduz uma distorção adicional em sistemas de transmissão em altas taxas [9]. Conseqüentemente a caracterização da PMD em redes de Bragg é importante no controle das distorções residuais destes dispositivos. Técnicas de medida convencionais (método interferométrico, varredura em comprimento de onda e Matriz de Jones) requerem uma grande largura espectral. No caso das redes de Bragg a região espectral de operação é bastante pequena, assim impedindo o uso destas técnicas convencionais de medida. Medidas do atraso de grupo e de suas flutuações utilizando o método do atraso de fase sofrem de limitação devido à resolução espectral finita da medida [30].

As medidas polarimétricas são baseadas na dependência espectral do vetor polarização  $\vec{S}$ :

$$\frac{d\vec{S}}{d\omega} = \vec{\Omega} \times \vec{S} \quad (4.1)$$

onde  $\vec{S}$  é o vetor de Stokes definido pelos parâmetros de Stokes ( $S_1, S_2, S_3$ ) que especificam o estado de polarização de saída da rede,  $\vec{\Omega}$  é o vetor dispersão de

polarização e  $\omega$  é a frequência óptica [13]. O atraso diferencial de grupo entre os modos de polarização são dados por  $|\bar{\Omega}|$ . A montagem experimental é mostrada na figura 41 (a). A saída do laser sintonizável é lançada na rede pela porta #1 do acoplador óptico 3 dB. Todas fibras são colocadas de maneira que fiquem esticadas para evitar qualquer estresse que possa gerar birrefringências adicionais. A conexão C entre a fibra contendo a rede e o acoplador, é casada com um gel casador de índice através de um ferrolho que permite a rotação dos eixos da rede em relação ao estado de polarização do laser (linear vertical) e em relação aos eixos do polarímetro.

O polarímetro foi colocado na porta 2 e a rede na porta 3 para medidas em reflexão. As reflexões de Fresnel na porta 4 e no final da rede foram eliminadas utilizando-se o corte em ângulo da fibra e um gel casador de índice. Substituindo a rede de Bragg por um espelho, a birrefringência residual das fibras dos rabichos e do acoplador foi verificada, constatando-se que esta era desprezível. Para medidas em transmissão o acoplador foi retirado e a fibra com a rede conectada diretamente no laser e no polarímetro. Novamente utilizou-se o mesmo gel casador e o ferrolho (C) que permitia o ajuste do ângulo dos eixos de birrefringência em relação aos eixos da polarização de saída do laser. As medidas utilizando o método do atraso de fase foram feitas substituindo o polarímetro da figura 41 (a) pelo fotodetector seguido de um voltímetro vetorial como mostrado na figura 41 (b). Um modulador eletro-óptico foi colocado entre o laser e o acoplador. Conexões do tipo APC e um isolador óptico antes do modulador foram utilizados para evitar flutuações na fase devido a reflexões espúrias.

Controladores de polarização (CP-1 e CP-2) permitiram o ajuste dos eixos do modulador E/O com os eixos dos outros elementos. A melhor resolução para a medida das flutuações no atraso diferencial de grupo foi obtida para a frequência de modulação de RF de 277.777 MHz, correspondendo ao máximo da amplitude de flutuação a qual pôde ser medida com uma razoável acurácia. Para frequências de modulação mais altas as flutuações desapareciam [30] e para frequências baixas a resolução de fase do voltímetro vetorial limitava a acurácia da medida. As medidas de DGD foram feitas ajustando-se o controlador de polarização (CP-2) para os casos de fase máxima e mínima. Para cada ajuste a frequência óptica foi

varrida gerando-se estas duas curvas de atraso diferencial de grupo, sendo que a diferença destas duas curvas é o DGD da rede.

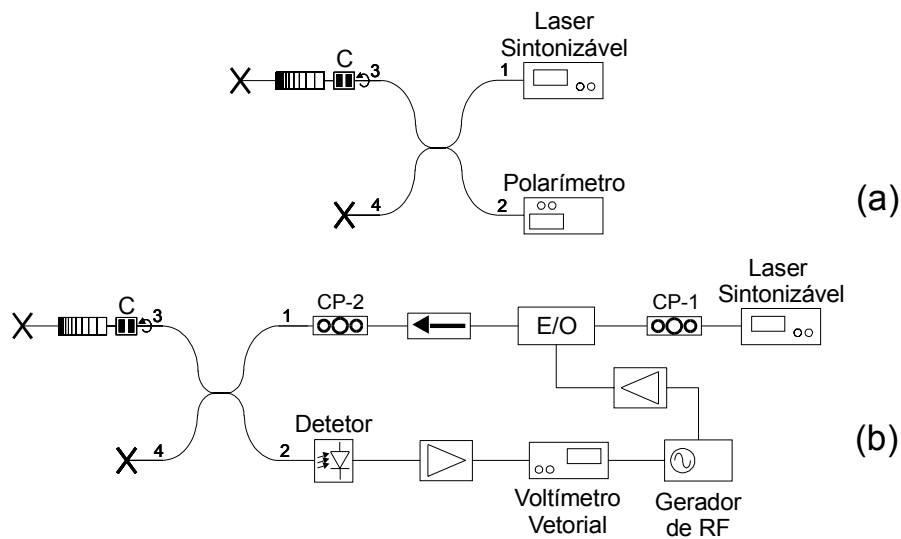


Figura 41 – Montagens experimentais: (a) medida polarimétrica, (b) medida pelo método do desvio de fase.

A Figura 42 mostra o espectro de refletividade e atraso de grupo para cada estado principal de polarização PSP para uma rede não apodizada com 10 *cm* de comprimento e 0.7 *nm* de largura espectral, centrada em 1554.2 *nm* com uma dispersão média de 1244 *ps/nm*. Através das medidas de intensidade é imediatamente visto que a refletividade depende do estado de polarização, sendo que as perdas dependentes da polarização (PDL) médias são de 0.4 *dB*.

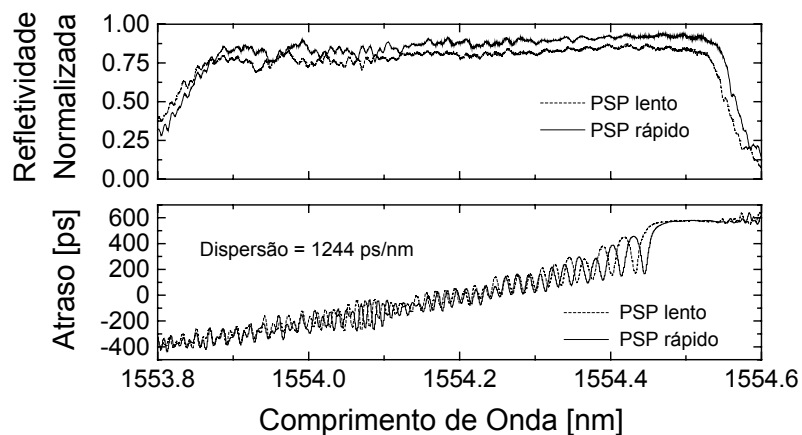


Figura 42 – Refletividade e atraso diferencial de grupo para cada PSP, para uma rede de Bragg não apodizada, 0.7 *nm* de largura espectral, centrada em 1554.2 *nm* com uma dispersão média de 1244 *ps/nm*.

A figura 43 mostra a evolução do estado de polarização de saída quando a luz é lançada a  $45^\circ$  com os estados principais da rede e a frequência óptica é variada dentro da região de reflexão da rede.

Deslocamentos contínuos e oscilações em movimentos para frente e para trás no estado principal de polarização devido ao *chirp* da rede são claramente vistos na figura 43, correspondendo à PMD ou aos eixos de birrefringência da rede. Resolvendo (4.1) obtém-se o DGD da rede e os resultados são mostrados e comparados com os resultados medidos pelo método do atraso de fase na figura 44. O sinal do DGD muda para cada inversão no movimento do SOP na esfera de Poincaré. O período das flutuações é de  $20\text{ pm}$  e as oscilações *rms* do DGD são de  $152\text{ ps}$  na medida polarimétrica. Já na medida de atraso de fase este valor é de  $140\text{ ps}$ , devido a sua limitada resolução.

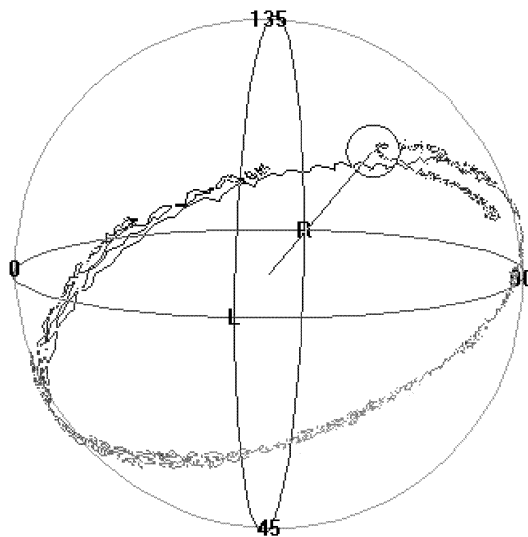


Figura 43 – Evolução do estado principal de polarização (PSP) na região de reflexão da rede quando os dos PSPs são igualmente excitados.

Por isso a diferença entre as flutuações pico-a-pico  $A$  e o valor medido pelo método do atraso de fase  $A_{meas}$  é dado por [30]:

$$A_{meas}(f_m) = A \operatorname{sinc}(2\pi f_m / f_p) \quad (4.2)$$

onde  $f_m$  é a frequência de modulação e  $f_p$  é o intervalo de repetição que caracteriza a flutuação. Considerando que o período de batimento e a frequência de modulação usada no experimento, (4.2) prevê que a técnica do desvio de fase

pode medir flutuações 8 % menores que as atuais. De fato o valor *rms* obtido com o método do atraso de fase é menor que o obtido pelo método polarimétrico pela mesma diferença de 8 %, indicando que não há limite de resolução para o método polarimétrico, como esperado.

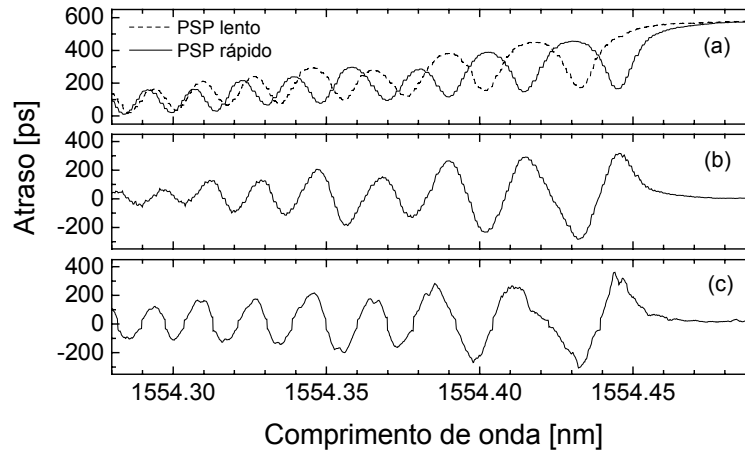


Figura 44 – (a) Curvas de atraso de grupo para fase máxima e mínima, (b) DGD da rede para medidas de atraso de fase, (c) DGD calculado pela excursão do SOP na esfera de Poincaré.

O valor médio  $\langle \Delta\tau \rangle$  da PMD da rede depende do *chirp* da rede e da birrefringência da fibra [23]:

$$\langle \Delta\tau \rangle = \lambda_{Bragg} \cdot D_g \cdot \frac{B}{n} \quad (4.3)$$

onde  $B$  é a birrefringência da fibra,  $\lambda_{Bragg}$  é o comprimento de onda de reflexão da rede,  $D_g$  é sua dispersão e  $n$  é o índice de refração da fibra. A birrefringência da fibra pode ser medida pela evolução do SOP transmitido fora da região espectral de reflexão da rede:

$$\Delta\phi = \frac{B \cdot L \cdot \Delta\omega}{c} \quad (4.4)$$

onde  $\Delta\omega$  é a variação na frequência óptica,  $\Delta\phi$  é o ângulo de rotação do SOP na esfera de Poincaré,  $L$  é o comprimento da fibra e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

A figura 45 mostra a evolução do SOP entre 1500 nm e 1580 nm para dois pedaços da mesma fibra, o pedaço mais longo inclui a rede e o menor está sem a rede. Vemos em ambas medidas que a birrefringência da fibra é da mesma ordem de magnitude ( $2.11 \times 10^{-5}$  e  $2.45 \times 10^{-5}$ ), mas diferem por mais que a acurácia da medida. Isto significa que a birrefringência da fibra é não homogênea sendo assim impossível conhecer com melhor precisão sua birrefringência na região da rede.

Não obstante, a PMD calculada a partir de (4.3) é  $\sim 30$  ps, o que está de acordo com os valores medidos pelas duas técnicas. Em todos os casos se observou que a birrefringência da rede e da fibra é linear com os mesmos eixos esperados por (4.3).

Neste caso conclui-se que a birrefringência induzida pelo processo de gravação da rede é desprezível quando comparada à birrefringência pré-existente.

O método polarimétrico para a medida das flutuações no atraso de grupo não sofre de nenhum tipo de limitação de resolução, exceto devido à resolução espectral da fonte laser, a qual para os casos medidos é de pelo menos duas ordens de magnitude menor que a resolução do método do atraso de fase.

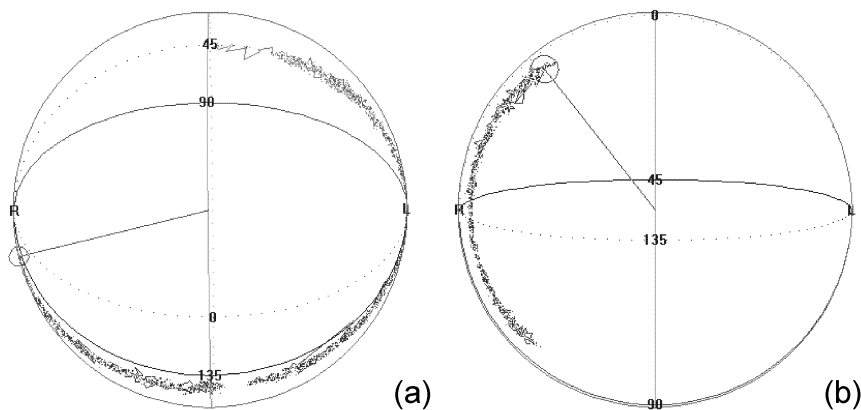


Figura 45 – Medida da birrefringência de 2 pedaços de fibra na qual a rede foi gravada. (a) Pedaço de fibra com 85.2 cm de comprimento contendo a rede. (b) Pedaço menor (38 cm) obtido cortando um pedaço da fibra onde a rede foi gravada. Em (a) a região espectral na qual a rede reflete foi excluída da medida, correspondendo ao menor gap na evolução do SOP.