

2 Métodos de Medidas

A seguir descreve-se teoria básica de medição da PMD baseada na discussão efetuada na referência 7.

Neste capítulo serão abordados os aspectos mais importantes dos métodos de medida da PMD, em particular o método de Análise Fixa ou Varredura de comprimento de onda (*Wavelength Scanning*) e o método Interferométrico.

Os problemas relacionados com PMD têm levado ao desenvolvimento de várias técnicas de medidas deste fenômeno. Basicamente teríamos que medir o valor médio de uma grandeza estatística que é o DGD. Ou seja, a medida do tempo de vôo de um pulso óptico de uma largura espectral estreita lançado em cada um dos modos, onde o valor instantâneo do DGD seria igual à diferença dos tempos de chegada dos pulsos [8].

Seria necessário repetir esta medida em diversas condições ambientais para se extrair daí o valor médio dos DGDs.

Este procedimento não é possível na prática por várias razões, entre elas a dificuldade de se medir tempos curtos com resolução e rapidez suficiente para se obter um número de amostragens capaz de fornecer uma estatística confiável.

Todos os métodos de medida fazem então uso do fato de que um fenômeno variável no tempo pode ter sua estatística avaliada no domínio da frequência ou seja, medindo-se o DGD, variando-se o comprimento de onda numa faixa suficientemente larga, obtém-se todos os valores que seriam obtidos numa estatística temporal.

Duas técnicas fazem parte, em particular, deste trabalho: a técnica de medida baseada no método interferométrico e no método de varredura por comprimento de onda, os quais serão apresentados para embasar teoricamente os dados colhidos nas amostragens de medidas.

2.1.

Analizador fixo ou Varredura de comprimento de onda (Wavelength Scanning)

No método de análise fixa de medida de PMD varia-se o comprimento de onda da luz polarizada incidente num meio birrefringente (sistema óptico) e com isto o estado de polarização da saída irá variar tão mais rapidamente quanto maior for a birrefringência.

A média do DGD é determinada estatisticamente pelo número de picos e vales na transmissão de potência óptica através de um polarizador que fará a varredura do comprimento de onda. Um polarizador é colocado na entrada da fibra e um analisador na saída, utilizando uma fonte sintonizável ou uma fonte de espectro largo, para variar o comprimento de onda, e um analisador de espectro óptico (OSA).

Os estados de polarização de saída de fibras e componentes ópticos geralmente traçam uma trajetória na esfera de Poincaré de acordo com a variação do comprimento de onda. No caso em que os componentes exibem uma birrefringência simples, a trajetória é um círculo com raio originado a partir do eixo de estado principal, conforme a figura 8.a. O diâmetro do círculo vai depender do balanço de energia entre os estados principais de polarização. O último círculo se confunde com um ponto no estado principal. Em contraste, a polarização de saída de um modo acoplado aleatoriamente, em fibras monomodo, movem-se irregularmente sobre a esfera, refletindo a dependência do comprimento de onda dos dois estados de polarização com o atraso diferencial de grupo (DGD). Este efeito pode ser verificado na figura 3.b.

No caso das fibras HiBi, na medida em que o comprimento de onda varia, a fase relativa entre os estados principais varia ciclicamente, de modo que o sinal é periódico devido o DGD ser constante. O exemplo do espectro desta medida em fibras HiBi está na figura 11.

Contando-se o número N de máximos do gráfico acima obtemos o DGD.

$$\Delta \tau = \frac{\Delta \phi}{\Delta \omega} = \frac{2\pi N}{\Delta \omega} = \frac{N}{2c} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (12)$$

Onde $\Delta \phi$ é o ângulo do arco em radianos e $\Delta \omega$ é a mudança incremental

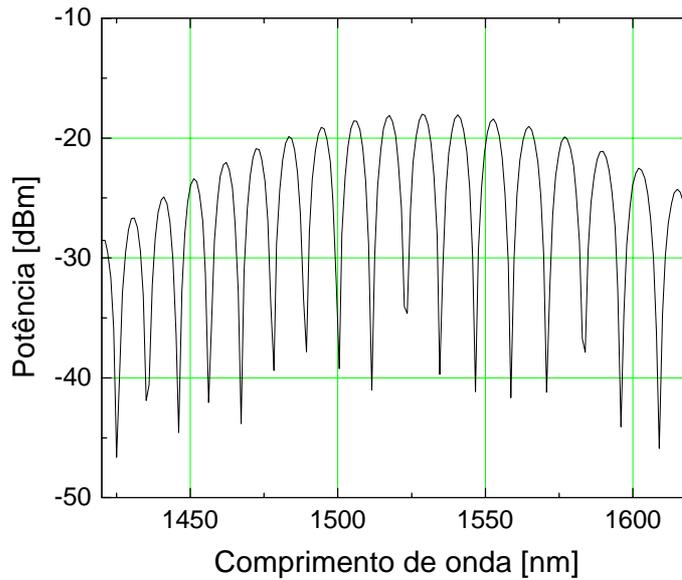


Figura 11 – Espectro de medida de PMD, pelo método de varredura do comprimento de onda para uma fibra HiBi.

da frequência óptica que produziu o arco, N o número de máximos em uma faixa de comprimento de onda (λ_1, λ_2).

A intensidade da fonte varia ao longo do espectro, de modo que é necessário corrigir os dados para evitar que o resultado seja afetado por flutuações não ligadas à birrefringência. Isto é particularmente importante quando a fonte é a ASE de uma fibra dopada com érbio, pois o espectro apresenta flutuações. Repetindo esta medida em uma série de comprimentos de onda obteremos DGD, atraso diferencial de grupo em função do comprimento de onda.

No caso de fibras normais, onde há forte acoplamento de modos, o espectro não é tão regular como o mostrado pela figura 11, mas com máximos e mínimos aleatórios como mostra a figura 12. O valor médio do DGD entretanto pode ser determinado da mesma forma, porém agora com um fator de correção. Este fator varia entre 0,824 (para acoplamento de modos 100% aleatórios) e 1 (para modos desacoplados).

$$\langle \Delta \tau \rangle = \frac{K \cdot N}{2c} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (13)$$

A técnica de contagem de máximos e mínimos pode levar a erros de julgamento de contagem no caso de fibras normais, devido à aleatoriedade na

forma dos ciclos, como mostrado na figura 12 podendo gerar erros na medida de PMD neste tipo de fibra. Para solução deste problema pode-se aplicar a transformada de Fourier na variação de amplitude medida pelo OSA (*Analisador de Espectro Óptico*), para obter o valor de PMD.

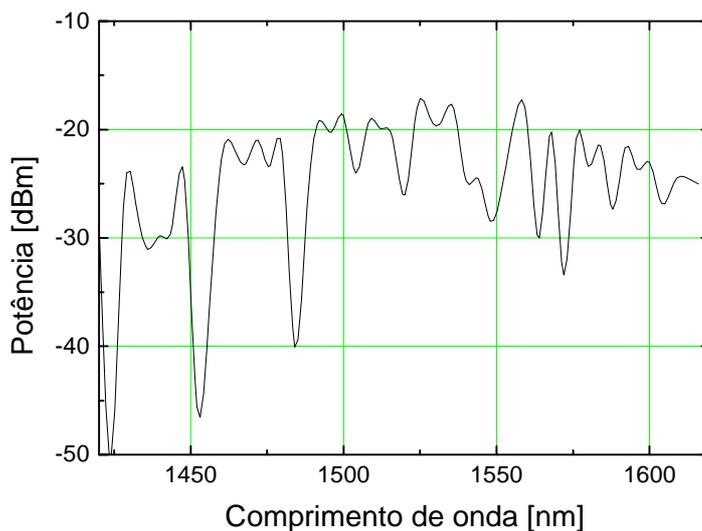


Figura 12 - Medida de PMD de uma fibra SM normal pelo método de varredura por comprimento de onda.

Esta transformada de Fourier pode ser ajustada por uma função Gaussiana, cuja largura à meia altura é igual a duas vezes o valor rms da distribuição dos DGDs.

Na figura 13 pode-se observar a montagem de algumas configurações para a execução da medida.

2.1.1. Processo de Medida e Configuração

Cada configuração de montagem do experimento para efetuar a medida de PMD se diferenciara pelo tipo de fonte de luz utilizada e pela maneira de definição da largura espectral e seleção do comprimento de onda.

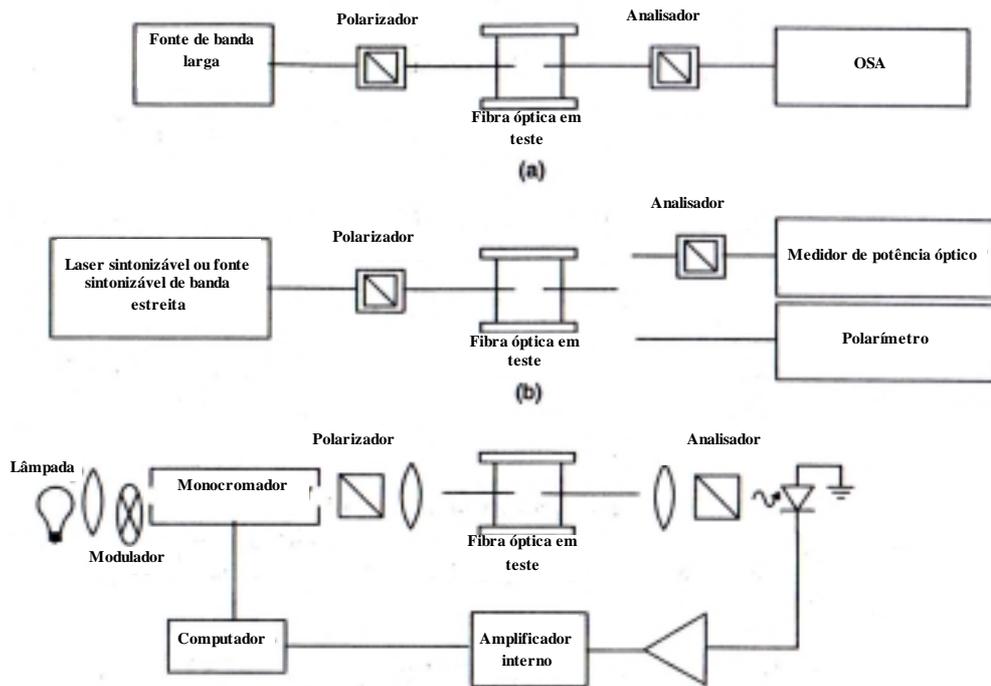


Figura 13 - Exemplos de montagem para a medida de PMD pelo método de varredura por comprimento de onda.

Para exemplificar o procedimento de contagem dos picos e vales podemos observar a figura 14.

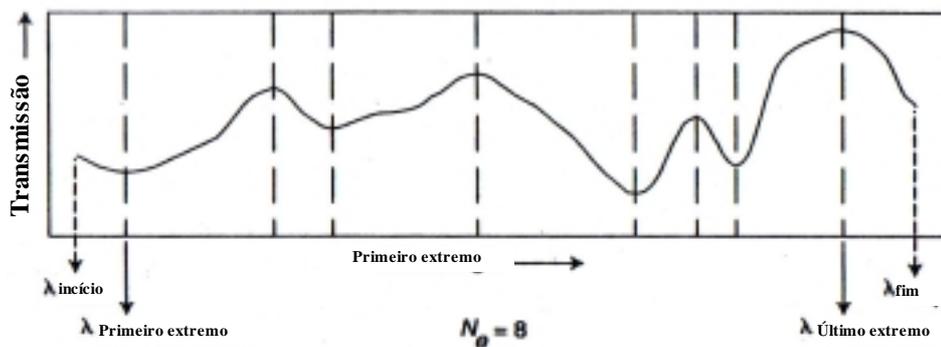


Figura 14 - Curva de resposta típica para a medida por varredura de comprimento de onda.

Para permitir a resolução adequada para a medida o artefato deve satisfazer o seguinte requisito, de acordo com a equação 14: [15]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} < \frac{1}{8\nu\Delta\tau} \quad (14)$$

onde $\Delta\lambda$ é a largura espectral da fonte ou a resolução da largura de banda do receptor, λ é o comprimento de onda nominal da medida, ν é a frequência em Hz e $\Delta\tau$ é o DGD do dispositivo em teste, em segundos. Os comprimentos de onda são em metros. Para o comprimento de onda o requisito é aproximado por:

$$\Delta\lambda (nm) < \frac{1}{\Delta\tau (ps)} \quad (15)$$

Os dados de medidas são coletados enquanto o comprimento de onda da fonte é varrido (ou do receptor, dependendo da configuração). Tipicamente, a medida de referência é colhida sem o analisador para correção da medida atual pela dependência da potência da fonte e a perda de inserção do componente sobre o comprimento de onda. Alternativamente, a medida de referência pode ser feita através de uma rotação física do analisador em 90° .

2.1.2. Análise pela Contagem de Extremos

Um método automático é geralmente utilizado para se extrair a informação de PMD de uma curva obtida de uma medida. Este método utiliza ou a contagem de extremos ou a análise de Fourier. A média do DGD pode ser obtida através da contagem de extremos aplicando-se a equação 16: [15]

$$\langle\Delta\tau\rangle_\lambda = \frac{kN_e\lambda_i\lambda_f}{2(\lambda_f - \lambda_i)c} \quad (16)$$

Onde:

$\Delta\tau$ é a média do DGD.

λ_i e λ_f e são os comprimentos de onda inicial e final varridos em metros,

N_e representa o número de extremos (picos e vales) que ocorrem sobre a varredura, e

c é a velocidade da luz.

O fator adimensional k já discutido no item 2.1.

Uma alternativa para o cálculo definido acima é substituir os comprimentos de onda inicial e final pelo comprimento de onda do primeiro λ_1 e do último

extremo λ_2 , respectivamente. Neste caso devemos reduzir o número de extremos em uma unidade devido à mudança no comprimento de onda dos pontos finais. Esta formulação deveria ser empregada em casos onde se queira medir fibras do tipo PMF (*Polarization Maintaining Fibers*) ou componentes como isoladores, por exemplo.

$$\langle \Delta\tau \rangle_\lambda = \frac{(N_e - 1)k\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (17)$$

Quando o número de extremos é grande, a diferença no resultado entre as duas equações é muito pequena. Normalmente a análise do comprimento de onda é feita automaticamente pelo equipamento de medição.

Picos e vales falsos podem ser causados pela dependência do comprimento de onda com a potência de saída da fonte óptica utilizada ou pela perda de inserção do conjunto, necessitando geralmente de medida de referência. Se a potência óptica se repete sobre o comprimento de onda, os picos falsos podem ser evitados pela taxação da medida a uma segunda varredura agora sem o analisador, ou executando a segunda varredura com o analisador de saída sendo fisicamente girado em 90°. Estas precauções não corrigem as flutuações rápidas no nível de potência óptica da fonte ou acoplamento óptico.

O intervalo de comprimento de onda sobre o qual o equipamento de medida de PMD por análise fixa irá trabalhar, deverá ser grande o suficiente para produzir uma estatística significativa de número de extremos.

Uma fibra de 70km com 0,08ps/√km, tem uma média de DGD de 0,669ps, requerendo uma largura de varredura de 97nm para produzir aproximadamente 10 ciclos de resposta de comprimento de onda varrido.

Para medidas de fibras monomodo, a precisão será maior quanto maior for o número de ciclos, entretanto estender a medida além de 10 ou 20 ciclos não seria muito vantajoso em termos de eficiência.

Alguma variação na medida de PMD destas fibras ocorrerá sobre diferentes polarizações lançadas. Isto é inevitável mas o valor mais central pode ser obtido repetindo a medida com diferentes orientações nos polarizadores de entrada e saída, ou com diferenciação na posição dos cordões de entrada e saída do equipamento de teste.

Em resumo esta técnica é sensível a vibrações, devido à introdução de flutuações de intensidade, podendo provocar máximos e mínimos espúrios à medida. A resolução da técnica está limitada pela largura espectral da fonte, pois para baixos valores de PMDs o número de oscilações é muito pequeno, necessitando de grande largura espectral para se observar oscilações no espectro. Porém para medidas de grandes PMDs o fator limitante será dado pela resolução espectral do OSA (*Analisador de Espectro Óptico*) utilizado.

Importante observar que os erros introduzidos por flutuações do estado de polarização por efeitos externos tendem a aumentar o valor medido para a PMD. Este aspecto é importante, sobretudo para valores baixos de PMD, próximos ao limite da técnica.

2.2. Método Interferométrico

O método de medida interferométrico de PMD é baseado na medida da autocorrelação do campo elétrico, ou coerência mútua, de dois sinais derivados da mesma fonte de espectro largo, que pode ser um LED (*Light Emitting Diode*). A luz é lançada na fibra através de um polarizador e a saída da fibra é conectada a um interferômetro de Michelson. Este método é baseado na medida direta do atraso temporal. O esquema de medida é ilustrado na figura 15.

No interferômetro, sendo um dispositivo integrado em fibra, ocorre o acoplamento dos modos de polarização, de modo que eles podem interferir entre si.

Assim, cada um dos estados principais de polarização pode interferir consigo mesmo ou com o outro. Dado que o espectro da fonte é muito largo, a interferência só ocorrerá quando os atrasos entre os dois braços do interferômetro forem iguais.

A máxima visibilidade ocorrerá quando as trajetórias dos comprimentos estiverem perfeitamente casadas. A largura da resposta é inversamente proporcional à largura espectral da fonte.

A amplitude de resposta do envelope é mostrada como função do atraso do tempo introduzido pelo movimento do espelho.

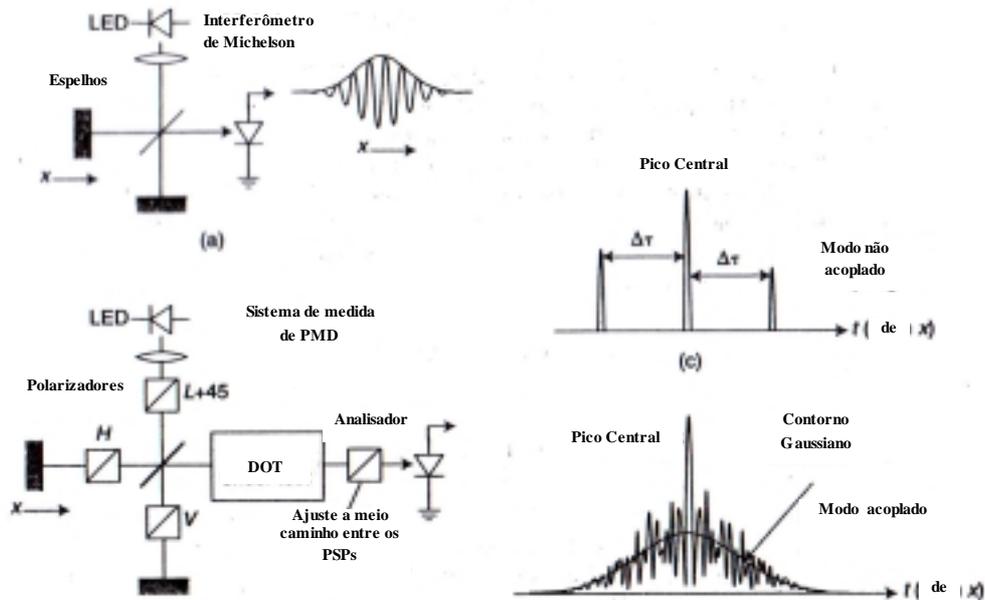


Figura 15 - Medida interferométrica de PMD. (a) interferômetro básico. (b) montagem do teste. (c) Curva de resposta para birrefringência simples. (d) resposta para modo de acoplamento aleatório.

O tempo de atraso é dado por:

$$\Delta t = \frac{2\Delta x}{c} \quad (18)$$

onde Δx é a distância do espelho a partir do ponto onde ambos os caminhos estão com comprimentos iguais.

Para uma fibra HiBi por exemplo, onde existem dois PSP de polarização linear, serão observados três picos de interferência: um central, correspondente à interferência de cada modo consigo mesmo, e dois laterais correspondentes à interferência cruzada entre os modos, onde o atraso de um modo ao longo da fibra é compensado no interferômetro. A figura 16 apresenta um interferograma típico observado para uma fibra HiBi. O DGD corresponde à metade da distância entre os picos externos ou seja, à distância entre o pico central e cada um dos picos externos. Observe que o pico central não contém nenhuma informação sobre a birrefringência, e pode ser eliminado do cálculo. Note também que no interferômetro as medidas são dadas diretamente em unidades temporais, visto que este sistema processa todos os comprimentos de onda ao mesmo tempo.

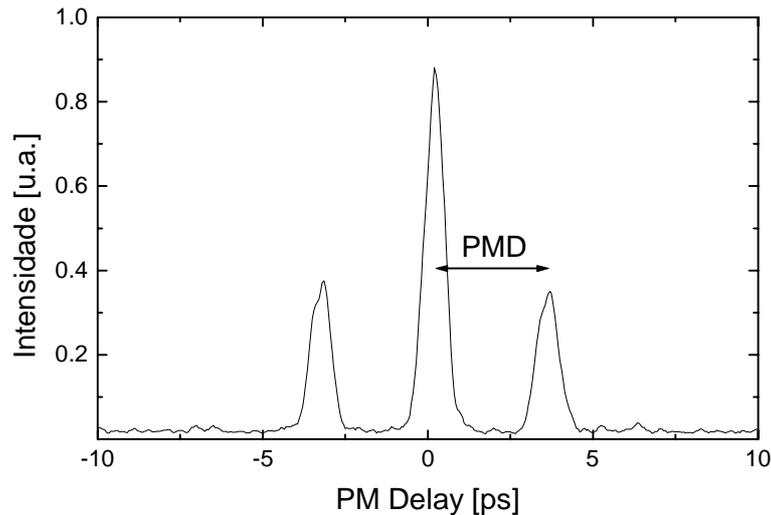


Figura 16 – Interferograma obtido com uma fibra HiBi na entrada do interferômetro.

No caso de fibras monomodo normais, o resultado é uma gaussiana com um ruído. Este ruído é produzido pelas fases aleatórias das franjas de interferência. A PMD pode ser obtida pela meia largura da gaussiana, como está indicado na figura 17.

Em termos práticos pode-se pensar que a fonte de baixa coerência emula pulsos cuja duração seria dada pela transformada de Fourier do espectro. Cada pulso propaga-se com um DGD diferente e a medida interferométrica pode ser entendida como uma medida direta da estatística dos atrasos de grupo ao longo da fibra. Em termos da largura σ do ajuste gaussiano, a PMD é dada pela equação 19:

$$\langle \Delta \tau \rangle = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma \quad (19)$$

Para uma largura do ajuste gaussiano igual a 1, a PMD da fibra em questão seria 0.92ps.

Um exemplo de espectro como o da figura 17 corresponde a uma fibra em que há um grande acoplamento de modos, de modo que a estatística pode ser considerada suficientemente boa para representar o sistema em seu comportamento médio. Entretanto, nem sempre este é o caso, pois uma fibra pode apresentar um pequeno número de acoplamentos e a distribuição estatística modifica-se.

No exemplo da figura 18, a fibra apresenta uma PMD muito mais alta, e a

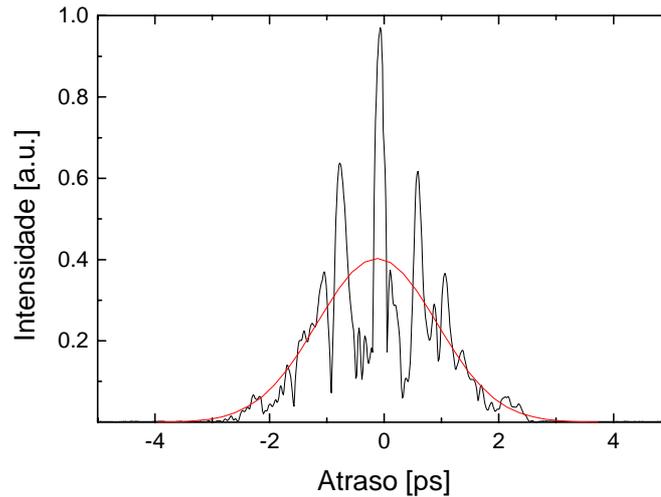


Figura 17 – Interferograma obtido com uma fibra normal na entrada do interferômetro.

distribuição de intensidade é não gaussiana, com um corte pronunciado em 22 ps. Este caso corresponde a um acoplamento relativamente pequeno entre os modos.

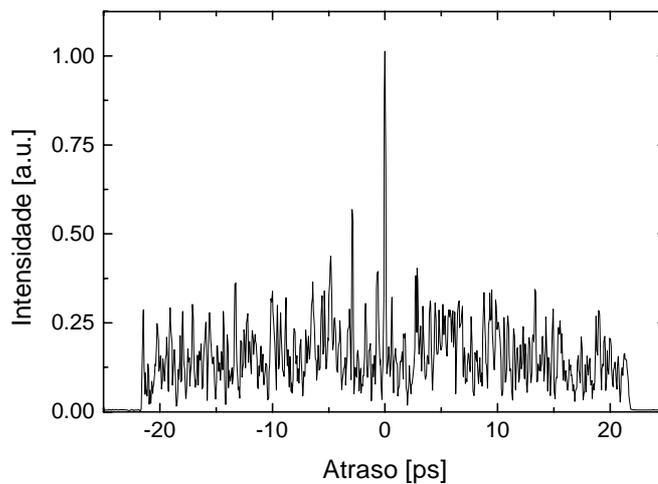


Figura 18 – Interferograma obtido com uma fibra normal com baixo acoplamento de modos.

O método interferométrico relaciona-se com o de varredura por comprimento de onda através da transformada de Fourier. A resolução da medida pelo método interferométrico está limitada pela largura espectral da fonte utilizada, pois o pico central é determinado pela transformada de Fourier do espectro desta fonte. Se tomarmos como exemplo um LED de largura espectral de $\sim 100\text{nm}$ a resolução da medida será a largura do pico central, que é de $0,07\text{ps}$ e será o valor limite para a medida de PMD. Na figura 19 podemos observar uma

medida de uma fibra normal com PMD muito baixa. Os atrasos são tão pequenos que as franjas concentram-se sob o máximo central, não podendo ser medidas. Os valores ficam abaixo do limite do equipamento e a leitura fornece o valor limite.

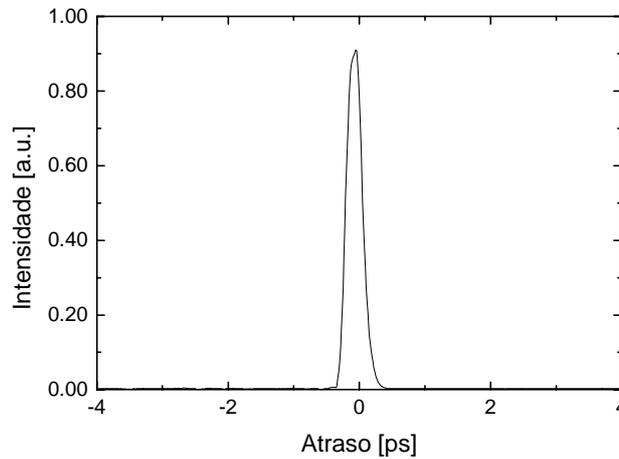


Figura 19 – Interferograma obtido com uma fibra normal com PMD muito baixa.

Esta técnica não é afetada por perturbações mecânicas externas, o que lhe oferece grande robustez e confiabilidade para medidas em campo. Embora podendo ser utilizada para medidas de alta resolução após modificação, a estabilidade da montagem passa a ser fator fundamental. Esta técnica permite medidas em linhas sem amplificação de até 200 km na janela de 1550 nm, apresentando então uma grande dinâmica. [7-8]