

A influência da temperatura na incerteza das medições envolvendo os efeitos da Dispersão dos Modos de Polarização em fibras ópticas

A. Bessa dos Santos¹, G. Borghi¹, J. Ferreira¹ e J. P. von der Weid²

¹Inmetro – Dimci, Duque de Caxias, RJ, Brasil, absantos@inmetro.gov.br

²Centro de Estudos em Telecomunicações/ PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, vdweid@cetuc.puc-rio.br

Abstract: Polarization Mode Dispersion (PMD) is the preponderant factor in modern high-speed long-distance optical transmission systems. We propose an analysis of the temperature influence in the uncertainty evaluation and the improvement of PMD effects measurement accuracy.

Palavras chave: comunicações ópticas, metrologia de fibra óptica, dispersão dos modos de polarização.

1. INTRODUÇÃO

A distorção em sinais ópticos devido ao efeito da Dispersão dos Modos de Polarização tem sido tema de vários estudos teóricos e experimentais [1-4]. Com o aprofundamento do conhecimento acerca dos mecanismos de geração e controle, a PMD se tornou um efeito crucial e determinante no dimensionamento de enlaces ópticos. As fibras ópticas monomodo são guias de ondas nos quais a luz se propaga em um único modo espacial. Entretanto dada à natureza vetorial do campo óptico, as fibras monomodo suportam, na verdade, dois modos de polarização com polarizações ortogonais e mesma distribuição espacial, são os chamados modos de polarização. Numa fibra óptica ideal, perfeitamente simétrica e sem tensões internas, os dois modos de polarização têm a mesma velocidade de fase e de grupo, ou seja, o índice de refração é o mesmo para as duas polarizações. Entretanto numa fibra óptica real a simetria nunca é perfeita, e sempre existem tensões externas assimétricas que atuam sobre o núcleo da fibra. Deste modo, o índice de refração passa a depender da orientação da polarização da luz em relação aos eixos principais da fibra, fenômeno este conhecido como birrefringência. Cada modo de polarização tem uma velocidade de grupo diferente dando origem à distorção do sinal chamada de Atraso Diferencial de Grupo (DGD). O valor do DGD é dado pelo atraso diferencial de grupo entre o estado de polarização rápido e lento na fibra e é expresso em ps. O DGD de uma fibra varia aleatoriamente com o comprimento de onda, λ . A dependência do λ ocorre devido às mudanças da polarização do sinal ao longo da fibra ocasionando diferentes dependências para cada λ , tal que os eixos rápidos e lentos de trechos da fibra são alinhados diferentemente para λ 's diferentes.

Na avaliação de desempenho de enlaces de fibra óptica, um parâmetro importante a ser avaliado é a interrupção da comunicação devido a PMD. Como o DGD varia aleatoriamente com a temperatura, stress mecânico, tempo ou comprimento de onda, alterando as propriedades da fibra ao longo do seu comprimento físico, ele pode apresentar valores máximos suficientemente altos para causar uma falha no sistema (outage), enquanto que seus valores médios estão satisfatoriamente baixos. O espectro do DGD medido em um dia, numa fibra óptica instalada, pode não ser o mesmo medido em um dia seguinte, isto se houver grande variação na temperatura ambiente [7]. A grandeza PMD é definida como o valor médio ou valor *rms* do DGD, sendo, consequentemente uma grandeza aleatória. Estas duas definições não convergem para um mesmo valor da PMD uma vez que a faixa de frequências ópticas para realizar as medidas varia conforme a fonte óptica a ser utilizada. Muitos autores descreveram métodos para diminuir a incerteza de medição da PMD utilizando a estatística da PMD de segunda-ordem (SOPMD), aplicando modelamentos matemáticos mais robustos ou desenvolvendo diferentes técnicas de medição. No entanto, quando se observa a dependência do DGD com a temperatura percebe-se que esta pode ser uma ferramenta bastante útil para a obtenção do valor médio do DGD com variância mínima. Certamente que este estudo pode ser mais facilmente realizado em ambientes onde se podem gerar temperaturas constantes e específicas.

O comportamento estatístico da PMD mostra que o dobro de um comprimento de fibra não representa o dobro do efeito analisado [8]. Pequenos comprimentos de fibra ou fibras de alta birrefringência (HiBi) podem ser considerados como sendo elementos com birrefringência uniforme; sendo que o tempo de atraso entre os dois modos de polarização, DGD, cresce linearmente com o comprimento da fibra. Para fibras normais, com um grande número de acoplamento nos modos, o DGD cresce com a raiz quadrada do comprimento da fibra. Como as características da PMD variam aleatoriamente com a temperatura, tempo e frequência, este fenômeno deve ser estudado estatisticamente.

As técnicas utilizadas para a medição da PMD são bastante conhecidas. A maioria dessas técnicas determina o atraso de grupo diferencial entre os estados da polarização na saída da fibra recorrendo a métodos do domínio da

freqüência [9], chamados de métodos polarimétricos. No domínio temporal, através da técnica interferométrica, pode-se determinar a PMD medindo o tempo de atraso de um pulso lançado sob várias polarizações de entrada na fibra. No domínio da freqüência pode-se determinar a PMD analisando a polarização sobre a esfera de Poincaré sob várias condições de polarização da entrada e saída. A média do DGD no domínio do tempo pode se tornar impraticável, isto porque o DGD pode variar muito lentamente, numa escala de várias horas e até dias, dificultando sua análise. Isto pode não representar uma amostra suficiente do possível comportamento do DGD. O método para medir a PMD no domínio da freqüência consiste em calcular a média do DGD para uma determinada faixa de λ .

Neste trabalho representaremos conceitos importantes relacionados ao método de medição da PMD no domínio da freqüência para dois regimes de temperatura, regime isotérmico e adiabático. Um ponto importante a ser ressaltado é a relevância da temperatura na medição do valor médio real do DGD e conseqüentemente sua distribuição estatística. Os experimentos foram realizados em laboratório aonde os efeitos externos a uma medição (condições ambientais) são controlados.

2. TEORIA BÁSICA DA PMD

A PMD pode ser representada como o atraso de grupo diferencial entre os dois estados principais de polarização (PSPs) e é definida vetorialmente como parâmetros de Stokes. Este vetor descreve a evolução do DGD na representação da esfera de Poincaré.

$$\vec{\Omega}(\omega) = \Delta\tau \cdot \hat{r} \quad (1)$$

Onde o comprimento do vetor $\vec{\Omega}(\omega)$ é igual ao DGD, $\Delta\tau$, e \hat{r} é o vetor direção de Stokes, que aponta em direção ao eixo rápido do PSP, na esfera.

A análise do DGD considerando as variações em relação à frequência óptica ω é feita tomando-se como base o vetor PSP. O módulo do vetor PSP, $|\vec{\Omega}|$, equivalente ao valor da DGD, também pode ser representado na coordenada cartesiana:

$$DGD \equiv \Delta\tau(\omega) = \sqrt{\Omega_x^2(\omega) + \Omega_y^2(\omega) + \Omega_z^2(\omega)} \quad (2)$$

A PMD pode ser determinada a partir de duas notações: pelo valor médio do DGD em relação ao comprimento de onda, $\langle DGD \rangle$, (eq.3) ou pelo valor rms do DGD (eq.4):

$$\langle DGD \rangle_{\omega_1-\omega_2} = \frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \Delta\tau(\omega) d\omega \quad (3)$$

$$DGD_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \int_{\omega_1}^{\omega_2} (\Delta\tau(\omega))^2 d\omega} \quad (4)$$

Observando estas expressões nota-se que estatisticamente tem-se uma amostra finita e que a largura

espectral da fonte óptica é uma fonte de incerteza dominante, ou seja, a largura espectral da fonte é determinante para sua exatidão [5, 6]. No regime de forte acoplamento de modo encontra-se uma equivalência entre as notações [3,6], originadas da distribuição Maxwelliana da DGD.

$$\langle DGD \rangle_{\omega} \cong \sqrt{\frac{8}{3\pi}} DGD_{rms} \quad (5)$$

3. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Optou-se por utilizar o método de medição polarimétrico. Este método utiliza uma fonte com largura espectral muito estreita, em geral um laser sintonizável, medindo-se os estados principais de polarização e o DGD ao longo de uma faixa de comprimentos de onda para então poder realizar a estatística. A medida dos PSP se faz lançando luz em três polarizações diferentes. Para determinar o atraso de grupo por este método faz-se o produto das matrizes para dois valores de comprimentos de onda muito próximos. Em termos comparativos, as técnicas utilizadas para a medição fornecem valores precisos para a PMD, e são equivalentes na maioria dos casos. Entretanto, algumas diferenças são importantes. A técnica polarimétrica fornece diretamente valores de DGD e de sua estatística, enquanto que as outras fornecem apenas os valores médios, ou seja, diretamente a PMD. Com isso, a técnica polarimétrica é mais abrangente, pois permite determinar também parâmetros tais como a PMD de 2ª ordem, que está ligada à variação da PMD com o comprimento de onda e tem influência na distorção de sinal.

Para a medição, foram utilizados um analisador de polarização, um laser sintonizado, no modo de varredura de 1530 nm a 1595 nm, com passo de 0,4 nm, e uma câmara climática com controle de temperatura e umidade. O equipamento mede a variação dos parâmetros de Stokes ao longo da varredura de λ e fornece também os valores de DGD e SOPMD. A fibra sob teste utilizada era uma bobina de fibra monomodo do tipo DS com, aproximadamente, 15 km e PMD de, aproximadamente, 0,570 ps.

O propósito deste trabalho não foi a análise da incerteza da medição em relação à largura espectral da fonte, mas seu efeito sob a influência da temperatura. Os três parâmetros de Stokes obtidos em função do λ permitem uma descrição completa do estado de polarização independentemente da potência do sinal. O comportamento e a estatística envolvendo o valor médio do DGD em fibras ópticas foi observado sob duas condições. Na primeira condição foram realizadas 200 medidas, mantendo-se a temperatura estável por todo o tempo, ou seja, a temperatura ambiente se manteve em $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. Na segunda condição, foi utilizada uma câmara climática para analisar tal efeito sob temperaturas que variavam de 0°C a 50°C , com variações de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ e as medidas foram realizadas considerando que a câmara se encontrava termicamente estabilizada. Isto foi verificado após serem realizadas medidas a cada 4 minutos durante um intervalo de 30 minutos, quando era avaliada a estabilidade das curvas de DGD x λ .

Como durante a medição da bobina de fibra DS houve grande dificuldade na estabilização térmica, o que aumentou

muito o tempo de medição, optou-se por construir um emulador com pedaços de fibra Hi-Bi com birrefringência de 1,16 ps, fornecendo um valor final de PMD de 0,35 ps, aproximadamente.

Os emuladores são comumente usados para analisarmos os efeitos de PMD em sistemas ópticos, como também simulações teóricas e dispositivos de compensação. Eles são usualmente construídos com pedaços de fibras de alta birrefringência (HiBi) ou com várias concatenações iguais destas fibras. Simulações numéricas com o método “*coarse-step*” também considera como uma fibra normal uma concatenação de pedaços de mesmo tamanho com uma dada birrefringência e ângulos aleatórios de acoplamento. Esta concepção de que os valores do tempo de voo espaçados igualmente ao longo da fibra modelada, difere de uma fibra monomodo real, embora as estatísticas de PMD sejam bem descritas pelo modelo. Uma aproximação diferente para caracterizar emuladores de PMD considera uma fibra monomodo como uma concatenação de vários pedaços de fibras HiBi com diferentes comprimentos e ângulos de acoplamento, desta forma considerando a distribuição do tempo de voo aleatório ao longo do dispositivo. Simulações numéricas que informam a dependência do comprimento de onda para os efeitos de PMD são de grande importância para previsões de distorções e penalidade em sistemas ópticos. Os emuladores de PMD são poderosas ferramentas utilizadas para testar a sensibilidade dos sistemas ópticos e componentes de compensação para a PMD. O emulador de PMD construído no laboratório possui um valor de aproximadamente 0,35 ps, construído com 8 pedaços de fibra HiBi sendo seus comprimentos aleatórios e emendas também dispostas aleatoriamente.

O procedimento adotado para a medição do emulador previu medidas na câmara quando a temperatura era elevada de 10°C até 50°C, em seguida sendo reduzida para o seu valor inicial. A faixa de comprimentos de onda gerada pelo laser variou de 1529 nm até 1522 nm, com passo de 0,4 nm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 1 apresenta as curvas espectrais do DGD da bobina de fibra DS para a condição de estabilidade de temperatura, sendo que foram tomados intervalos de 12 horas em 3 dias de medição. As curvas do DGD em função do λ para este regime apresentaram uma forte correlação, como visto nesta figura.

O valor da PMD, obtido do valor médio do DGD para esta condição foi 0,658 ps com um desvio padrão de 0,007 ps num total de 200 pontos. Isto representa 200 curvas espectrais em tempos diferentes, porém com mesma temperatura, sendo que na Fig. 1 estão apresentadas apenas 6 curvas que representam tal variação com uma temperatura estável de 20°C.

Deve-se ressaltar que o valor médio do DGD utilizado para o cálculo da PMD, neste caso, é uma média dos valores instantâneos do DGD para cada comprimento de onda, sendo, portanto, uma média de 160 amostras.

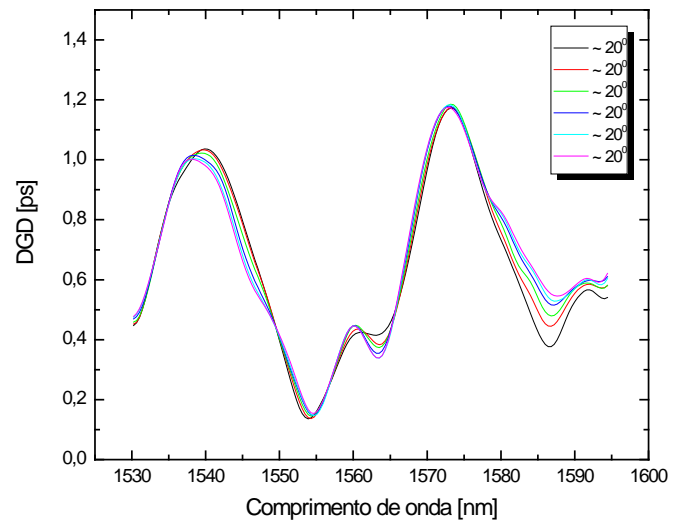


Fig. 1. Curvas do DGD para a mesma temperatura em tempos diferentes.

Na Fig. 2 mostramos a distribuição estatística do valor médio do DGD, que representa a PMD, para o total de medições realizadas.

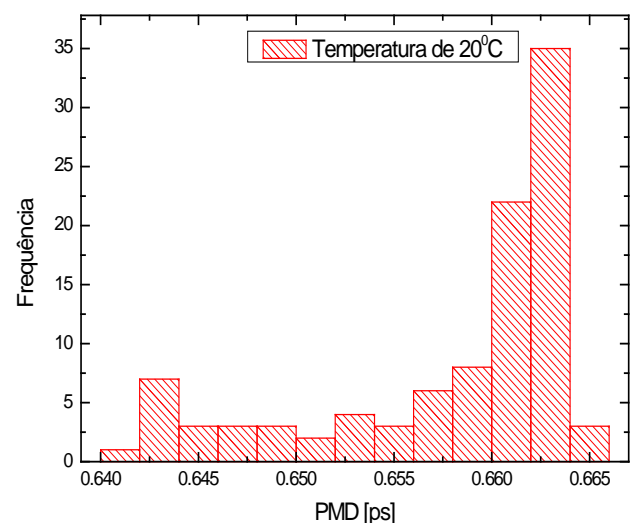


Fig. 2. Distribuição estatística da PMD para o regime de temperatura estável.

A Fig. 3 apresenta as curvas do DGD em função do λ para 6 diferentes temperaturas e a Fig. 4 mostra a curva de distribuição estatística da PMD obtida a partir de 500 pontos. Estes 500 pontos representam 500 curvas do DGD em função do λ para diferentes temperaturas que flutuavam entre 0°C e 50°C. O valor médio do DGD e o desvio padrão da distribuição para este regime foram 0,577 ps e 0,068 ps respectivamente. Vale ressaltar que todas as medições foram realizadas depois de alcançada a estabilidade térmica da bobina.

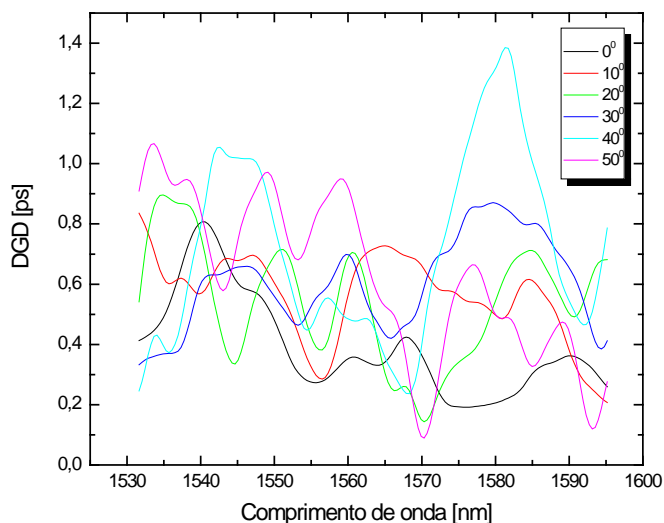


Fig. 3. Curvas do DGD para temperaturas diferentes em tempos diferentes.

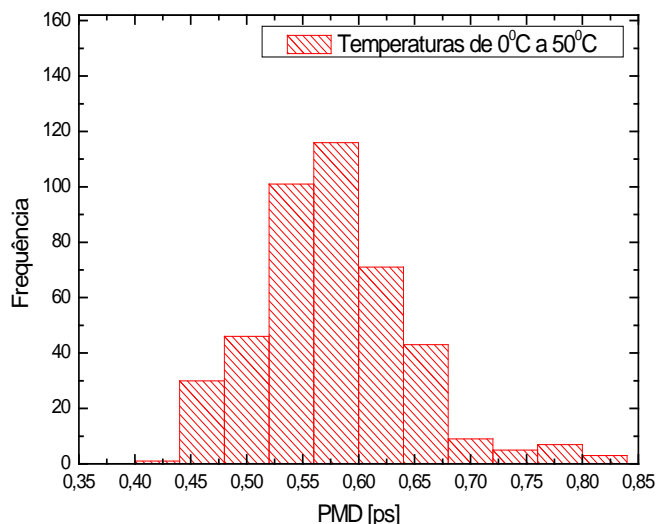


Fig. 4. Distribuição estatística da PMD para o regime de temperatura variável.

Nas medições realizadas em regime estável de temperatura, pode-se observar que o valor médio do DGD juntamente com seu desvio padrão difere bastante dos resultados obtidos no regime adiabático. No primeiro caso, embora o desvio padrão de medição tenha sido bem menor do que o encontrado para o segundo caso, representando uma estabilidade da medição, o valor médio medido encontrava-se mais afastado do valor da PMD esperado para a bobina sob teste. Para a segunda condição de medição, o valor médio medido diferiu apenas 0,007 ps do valor esperado de 0,570 ps, embora com desvio padrão mais elevado (0,068 ps). Desta forma, considerando a PMD como uma grandeza estatística, não se pode considerar a análise formal da metrologia, onde, geralmente, o melhor resultado de medição é aquele com menores desvios padrão e, consequentemente, menores incertezas, mas sim o valor

médio obtido do maior número possível de variações das curvas DGD x λ , exemplificado na Fig. 3. Isto mostra a importância da temperatura na exatidão e incerteza de medições envolvendo o DGD.

As medidas realizadas no emulador de 0,35 ps apresentaram resultados bastante próximos dos obtidos para a bobina de fibra, mesmo que observado a instabilidade térmica para bobinas com comprimentos de fibra muito grandes. As pequenas variações de medição do DGD, que podem ser vistas nos comprimentos de onda entre 1540 nm a 1546 nm, em 1563 nm e entre 1579 nm a 1586 nm, mostrados na Fig. 1, não aparecem nas curvas do DGD medidos no emulador. A Fig. 5 apresenta seis curvas de DGD x λ medidas no emulador de 0,35 ps nas temperaturas de 10°C, 25°C e 40°C, durante período de medição de 200 curvas. Observa-se uma maior estabilidade do dispositivo sob teste para uma mesma temperatura mantida estável.

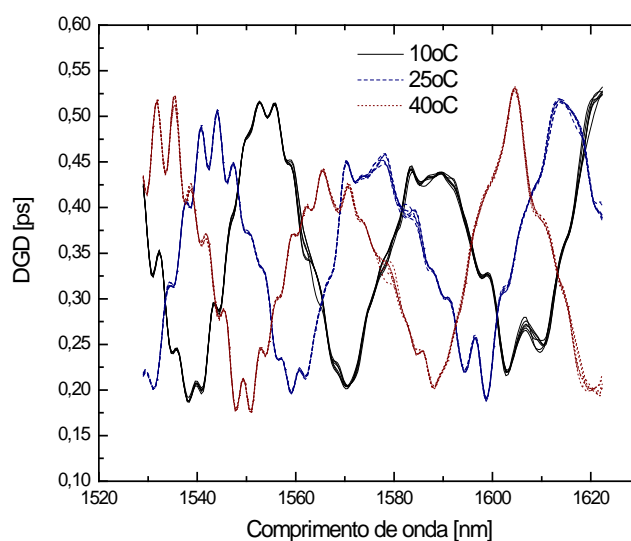


Fig. 5. Curvas do DGD para o emulador para as temperaturas de 10°C, 25°C e 40°C em tempos diferentes.

O comportamento do DGD em função de λ é bastante diferente para as diferentes temperaturas apresentadas na Fig. 5. Pode-se observar, de fato, um padrão de comportamento: mesmo número de valores máximos e mínimos ao longo de λ . Entretanto, as curvas estão deslocadas no eixo horizontal de, aproximadamente, 10 nm entre temperaturas adjacentes. Diferentemente do comportamento encontrado na bobina de fibra, apresentado na Fig. 3.

A Tabela 1 mostra o resultado do cálculo do valor médio e desvio padrão para as 200 amostras dos valores de DGD(λ) para cada temperatura. Cada uma destas amostras (valor médio de DGD) equivale a média dos valores da DGD instantânea para todos os 230 comprimentos de onda. Os desvios padrão são bastante reduzidos para este tipo de medida, comprovando que a estabilidade na medição, e os valores médios oscilaram em torno de 0,35 ps, porém não se observou uma tendência, quando tomamos como base as três temperaturas apresentadas.

Tabela 1. DGD médio e desvio padrão para três temperaturas estáveis do emulador.

Temperatura [°C]	Média [ps]	Desvio padrão [ps]
10	0,348	0,001
25	0,358	0,001
40	0,343	0,0007

A distribuição estatística no regime estável também não se caracteriza por um ajuste Maxwelliano, isto é, não representa uma distribuição compatível com estudos teóricos a respeito do DGD em fibras ópticas. Para que se obtenha uma distribuição Maxwelliana é necessária uma quantidade de amostras (valores medidos de DGD $\times \lambda$) muito elevada ($> 10^6$), o que torna inviável ser obtido, principalmente quando se trata de medições em campo nas fibras instaladas. Esta discussão é importante, pois coloca em questão o fato de que em medições do DGD sob o domínio da frequência, a temperatura é um importante parâmetro para a determinação do “correto” valor médio do DGD (ou um valor verdadeiro desta grandeza), bem como seu desvio padrão. Comparando as distribuições estatísticas dos DGDs de ambos os regimes, pode-se verificar que a distribuição do regime de temperatura estável é menos perfeita a um ajuste Maxwelliano do que no regime adiabático.

Sabe-se que em medições da PMD utilizando o método interferométrico, ou seja, no domínio do tempo, existe a necessidade de várias medições com diferentes polarizações de entrada. Isto aumentaria a exatidão e a incerteza da medida. No método polarimétrico, ou seja, no domínio da frequência, ainda não foi colocado nenhuma avaliação quanto à necessidade de se obter medidas i.i.d., **(colocar o que significa i.i.d.)** desta forma garantindo uma estatística mais robusta. Verificou-se que quando a exatidão e a incerteza da medição estão relacionadas à temperatura, ou condições ambientais, obtêm-se medidas mais exatas. Foi discutido que para um aumento da exatidão da medição é importante que as curvas do DGD em função do λ sejam realizadas não somente em tempos distintos, mas que ocorram variações da temperatura nas escalas apresentadas.

5. CONCLUSÃO

O valor médio do DGD foi estudado para dois diferentes regimes de temperatura. No regime onde a temperatura foi variada a cada medição, obtendo assim diferentes curvas do DGD em função da temperatura, a distribuição do DGD está de acordo com previsões teóricas e experimentais, que mostram uma função Maxwelliana como resultado, mesmo que para um reduzido número de amostras. Isto não pode ser dito para o regime isotérmico. Este trabalho visa esclarecer pontos importantes relacionados à exatidão e a incerteza da medição da PMD no domínio da frequência, pois o valor médio do DGD medido em uma fibra óptica em instantes diferentes, porém com temperaturas iguais, levaram a um resultado onde o valor médio do DGD flutuou entre um máximo e um mínimo, dependendo da temperatura estabilizada. Seu desvio padrão foi muito menor do que o

seu valor real e com isso, o valor médio e a incerteza da grandeza PMD ficaram alterados, levando a um erro de medição.

Pode-se citar como exemplos de sistema que estão em regime de estabilidade e não de variação de temperatura os casos de cabos submarinos e cabos terrestres respectivamente. É importante salientar que o nosso foco está relacionado aos efeitos da PMD em bobinas e cabos ópticos de fibras que serão analisadas e caracterizadas a princípio, em condições normais de temperaturas em laboratório. Este trabalho servirá como apoio para o desenvolvimento de um sistema de calibração e caracterização dos efeitos da PMD no laboratório de Comunicações Ópticas da Divisão de Telecomunicações do Inmetro. Sabendo que a princípio, a temperatura em qualquer laboratório, sob condições normais se mantém estável, este trabalho vem auxiliar e esclarecer os problemas que envolvam a melhoria das técnicas de medição e avaliação da PMD, visando aumentar a exatidão e reduzir as incertezas de medição da grandeza PMD.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Caponi, B. Ripsati, A. Rossaro, and M. Schiano, “WDM design issues with highly correlated PMD spectra of buried optical cables,” in Proc. OFC, 2002, pp. 453–455.
- [2] J. Nagel et al., “Long-term PMD mitigation at 10 Gb/s and time dynamics over high-PMD installed fiber,” in Proc. ECOC, vol. 2, 2000, pp. 31–32.
- [3] G. J. Foschini, C. D. Pole, “Statistical Theory of Polarization Dispersion in Single Mode Fiber”, Journal of Lightwave Technology, pp. 1439-1456, vol. 11, no.9, November 1991.
- [4] A. O. Dal Forno, A. Paradisi, R. Passy and J. P. von der Weid, Experimental and Theoretical modeling of Polarization-Mode Dispersion in Single-Mode Fibres, IEEE Photonics Technol. Lett. 12, 3, (2000).
- [5] N. Gisin, B. Gisin, J. P. von der Weid, R. Passy, “How Accurately Can One Measure a Statistical Quantity Like Polarization-Mode Dispersion”, IEEE Photonics Technology Letters, pp. 1671-1673, vol. 8, no. 12, December 1996.
- [6] B. L. Heffner, “Influence of optical source characteristics on the measurement of polarization-mode dispersion of highly mode-coupled fibers”, Optics Letters, pp. 113-115, vol. 21, no. 2, January 1996.
- [7] M. Karlsson, J. Brentel, and P. A. Andrekson, “Long-term measurement of PMD and polarization drift in installed fibers,” J. Lightwave Technol., vol. 18, pp. 941–951, July 2000.
- [8] A. Bessa dos Santos, M. R. Jimenez, J. P. Von der Weid and A. Djupsjobacka, “Statistical Measurements of Fluctuations due to PMD in 10Gb/s Optical Transmissions”, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 14, No. 7, pp. 926-928, 2002.
- [9] N. Gisin, J. P. Pellaux, “Polarization mode dispersion: time versus frequency domains”, Optics Communications, pp. 316-323, vol. 89, no. 2,3,4, May 1992.