



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO XV

GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS - GTL

SOLUÇÕES PARA MITIGAÇÃO DA PMD EM CABOS OPGW PARA UTILIZAÇÃO EM SISTEMAS ÓPTICOS DWDM DE ALTA CAPACIDADE

João Batista Rosolem* Roberto Arradi Claudio Florida Fabio Donati Simões
Fundação CPqD Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações

RESUMO

Este trabalho analisa o efeito da PMD em sistemas ópticos com ênfase em sistemas que fazem uso de cabos OPGW mostrando a estatística dos valores da PMD de cabos instalados no Brasil, seus efeitos sistêmicos e as alternativas tecnológicas para solução do problema sejam do ponto de vista do fabricante do sistema, como do ponto de vista das empresas proprietárias do cabo OPGW.

PALAVRAS-CHAVE

PMD, OPGW, Fibras Ópticas, DWDM, 100 Gigabit Ethernet.

1.0 - INTRODUÇÃO

A mais de uma década que as empresas de energia elétrica tem utilizado cabos pára-raios OPGW (*Optical Ground Wire*) na interligação de sub-estações ou para outras aplicações. Inicialmente com o propósito de usar dois pares de fibra do cabo para serviços de tele-supervisão e telemetria, hoje a utilização do restante das fibras dos cabos OPGW propicia grande rentabilidade a estas empresas através do "aluguel" das mesmas para as empresas de telecomunicações. A alta valorização da infra-estrutura passou a ser considerada nos projetos de telecomunicações e estudos demonstram que, em um projeto de telecomunicações, os investimentos com infra-estrutura representam 40% do total do projeto. Por este motivo as empresas de telefonia e transmissão de dados mostraram-se bastante interessadas em explorar a rede de fibra óptica servida por cabos pára-raios OPGW e têm efetivamente utilizado esta alternativa na transmissão de longa distância de seus sistemas DWDM de 2.5 e 10 Gb/s.

Devido à crescente demanda de tráfego alavancada pelo rápido crescimento de usuários e serviços providos pela internet a utilização de sistemas ópticos DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) com taxas a partir de 10 Gb/s é hoje uma realidade nas operadoras de telecomunicações. Testes de campo do padrão 100 Gigabit Ethernet são comuns na atualidade [1] e dentro em breve teremos sistemas comerciais operando nesta taxa.

Porém a transmissão de sinais a partir de 10 Gb/s em fibras ópticas de cabos OPWG, bem como em outros tipos de cabos ópticos, esbarra no problema da PMD (*Polarization Mode Dispersion*). A PMD que é um efeito estatístico, causa o alargamento dos pulsos transmitidos pelas fibras, sendo que este efeito tem forte dependência com a tensão mecânica e a temperatura impostas as fibras ópticas dentro do cabo. O efeito da PMD limita seriamente a transmissão em taxas de transmissão iguais e superiores a 10 Gb/s.

Diversas soluções tem sido desenvolvidas para mitigar o problema da PMD sendo que entre elas temos o uso de compensadores de PMD ópticos e eletrônicos, o uso de novos formatos de modulação, o uso de FEC (*Forward Error Correction*), a localização e substituição de cabos com fibras de altos valores de PMD, a utilização de mais regeneradores eletrônicos, entre outras.

Este trabalho analisa o efeito da PMD com ênfase em cabos OPGW mostrando a estatística dos valores da PMD de cabos instalados no Brasil, seus efeitos sistêmicos e as alternativas tecnológicas para solução do problema

sejam do ponto de vista do fabricante do sistema, como do ponto de vista das empresas proprietárias do cabo OPGW.

2.0 - A PMD E SEUS EFEITOS SISTÊMICOS

Uma fibra óptica do tipo monomodo guia na realidade dois modos associados com os estados de polarização da luz. Em uma fibra óptica perfeita estes dois modos viajam na mesma velocidade, mas em fibras ópticas reais que apresentam assimetrias e imperfeições estes dois modos apresentam descolamento, ou seja, suas velocidades de propagação são diferentes. Este efeito conhecido como birrefringência é proporcional a diferença de índices de refração dos dois principais estados. Como esta polarização envolve todo o comprimento da fibra, o efeito gerado pode alargar os pulsos ou mudar sua forma de tal maneira que causam elevada taxa de erros na recepção. O alargamento do pulso causado pela diferença na velocidade dos modos é chamado de *Differential Group Delay* (DGD), conforme mostra a Figura 1.

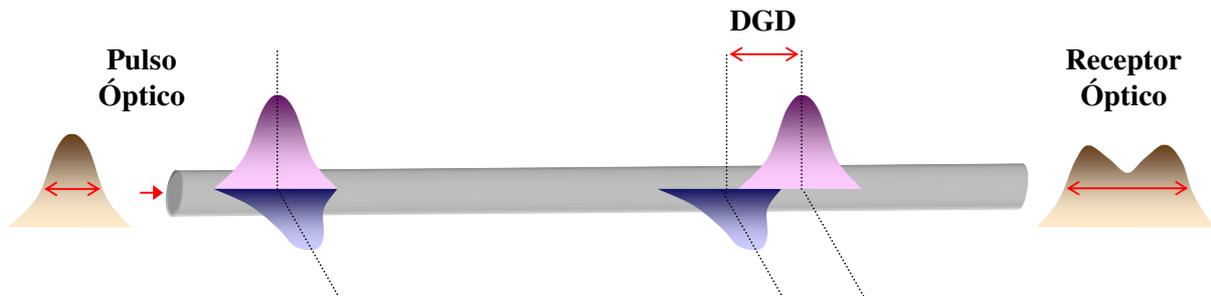


Fig. 1 - Alargamento do pulso causado pela diferença na velocidade dos modos.

Pequenas variações ao longo da fibra óptica podem afetar a DGD e podem também fazer com que a luz alterne entre os dois estados de polarização de uma forma aleatória ao longo do enlace óptico. Além dos problemas de variação da geometria da fibra outros fatores externos podem criar a PMD na fibra óptica. Entre estes fatores temos: forças devido a curvaturas, trançamento do cabo e *stress* [2]. Os fatores externos em geral são dependentes de como a fibra é cabeada e de que forma e onde o cabo é instalado. A fibra é então sujeita ao *stress* mecânico que varia com o tempo, lugar, temperatura e vibrações mecânicas. Conseqüentemente a DGD pode variar de uma forma estatística com o tempo (ver Figura 2(a)), com o comprimento do enlace e também com o comprimento de onda de operação do sinal.

Uma importante observação a ser feita é que os valores de PMD medidos em fibras não cabeadas geralmente divergem dos valores medidos em fibras cabeadas. Apesar de vários estudos terem sido feitos para correlacionar estes valores nenhuma correlação foi encontrada.

A probabilidade da DGD de uma seção de fibra apresentar um dado valor em um dado instante do tempo é dada pela distribuição Maxwelliana conforme mostrado na Figura 2(b), onde $\Delta\tau$ é a DGD e $\langle\Delta\tau\rangle$ é o valor médio da DGD. A integração desta função densidade de probabilidade (de $\Delta\tau_1$ até $+\infty$) resulta na probabilidade da DGD ser maior que um valor $P(\Delta\tau \geq \Delta\tau_1)$. Esta probabilidade de $P(\Delta\tau \geq \Delta\tau_1)$ é mostrada na Figura 3. Por exemplo se a DGD é maior que 3 vezes a média da DGD, $\Delta\tau_1 = 3\langle\Delta\tau\rangle$ então pode ser visto nesta figura que a probabilidade $P(\Delta\tau \geq 3\langle\Delta\tau\rangle)$ é de aproximadamente 4×10^{-5} [3].

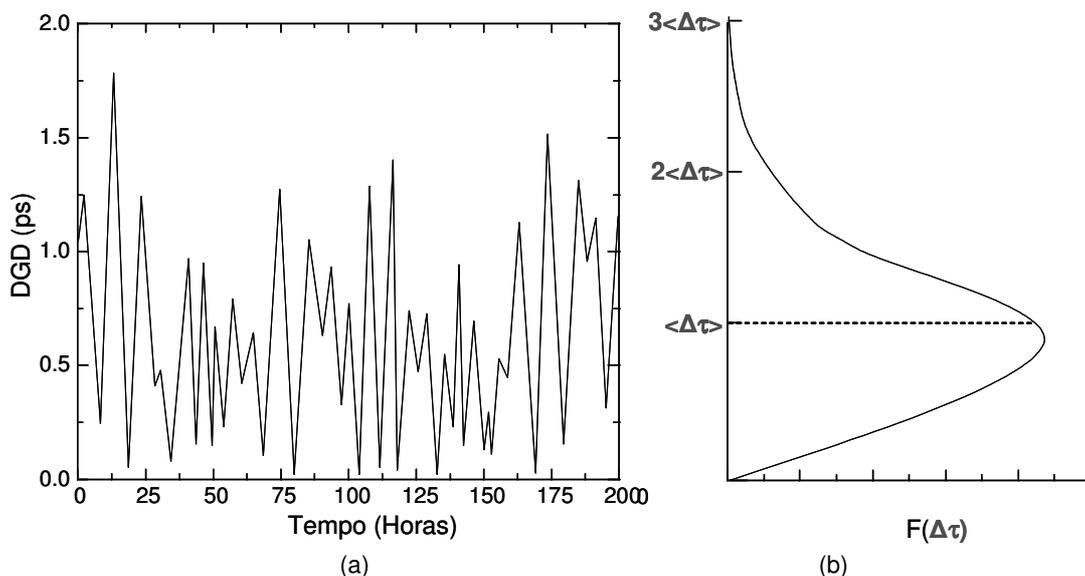


Fig. 2 – (a) Variação estatística da DGD com o tempo e (b) distribuição Maxwelliana da probabilidade da DGD.

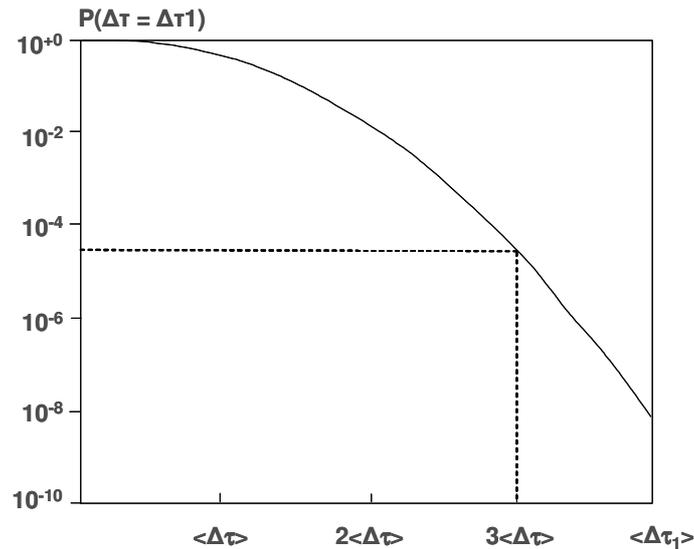


Fig. 3 - Probabilidade de $P(\Delta\tau \geq \Delta\tau_1)$. Adaptado de [3].

As variações temporais da DGD condicionam o tempo de interrupção do sistema (“outage time”). Por exemplo, se $\Delta\tau = 3\langle \Delta\tau \rangle$ com probabilidade de 4×10^{-5} o tempo de interrupção do sistema será de 21 minutos por ano. Algumas normas internacionais para PMD [4] recomendam uma probabilidade de 6.5×10^{-8} , o que corresponde a um tempo de interrupção do sistema de 2 segundos por ano.

Outro parâmetro muito usado no projeto dos sistemas ópticos é o coeficiente de PMD. Este parâmetro é dado pela DGD dividido pela raiz quadrada do comprimento de fibra ($\text{ps}/\text{km}^{1/2}$).

No projeto sistêmico do enlace é considerado uma penalidade de 1 dB na sensibilidade do receptor devido a PMD. Esta penalidade ocorre para uma DGD equivalente a 30% do período do bit (ver Figura 4(a)) considerando que ambos os estados de polarização carregam a mesma energia da potência óptica do sinal. Este valor de DGD é denominado de $DGD_{\text{máx}}$. A Figura 4(b) mostra a penalidade para sistemas empregando diversas taxas de transmissão. Para 2,5 Gb/s cuja período do bit é de 400 ps a penalidade de 1 dB ocorre para uma $DGD_{\text{máx}}$ de 120 ps enquanto que para 10 Gb/s, 40 Gb/s e 100 Gb/s esta mesma penalidade ocorre para DGDs respectivamente de 30 ps, 7,5 ps, e 3 ps. Pode ser observado que para valores superiores de DGD equivalentes a 30% do bit a penalidade sobe rapidamente principalmente para os sistemas com taxa superior igual ou superior a 10 Gb/s. No projeto dos sistemas considera-se que estes valores de PMD sejam equivalentes a três vezes a média da DGD e especifica-se como aceitáveis um terço ($1/3 DGD_{\text{máx}}$) destes valores de tal forma que a probabilidade de que se atinja os valores para 1 dB de penalidade seja de 4×10^{-5} conforme já discutido anteriormente, ou seja, os valores para a DGD média seriam 40, 10, 2,5 e 1 ps respectivamente para 2,5, 10, 40 e 100 Gb/s. Se considerarmos um sistema DWDM com amplificadores ópticos de 400 km de extensão os coeficientes máximos de PMD permitidos para 2,5, 10, 40 e 100 Gb/s seriam respectivamente de 2,0, 0,5, 0,125 e 0,05 $\text{ps}/\text{km}^{1/2}$.

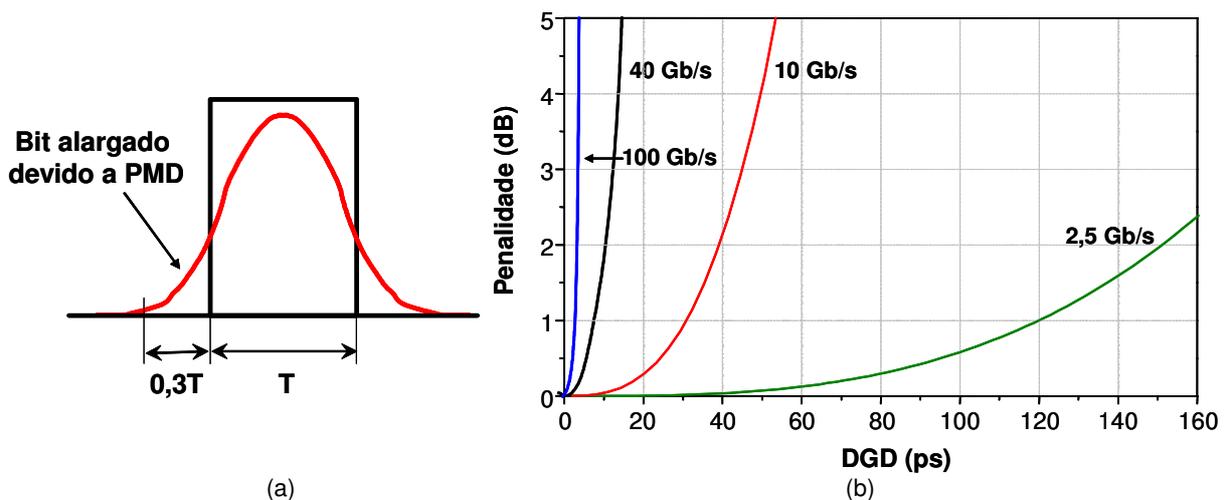


Figura 4 – (a) Alargamento de 30% no período do bit devido a PMD e (b) penalidade para sistemas empregando diversas taxas de transmissão.

Na propagação do sinal pela fibra a energia de um modo passa para o outro. Este mecanismo é responsável pela dependência da PMD com as condições ambientais e também com o comprimento de onda do sinal, dando

origem ao que chamamos de PMD de segunda ordem (SOPMD) [2]. A variação da PMD em relação ao comprimento de onda resulta em uma dispersão que é função da largura de banda do canal e do valor da DGD dentro daquela largura de banda. A existência da SOPMD torna mais difícil a compensação única da PMD em sistemas WDM.

Finalmente deve-se acrescentar que além da fibra diversos componentes do sistema óptico tais como compensadores de dispersão cromática, amplificadores ópticos, multiplexadores, entre outros, também podem contribuir com a PMD total do sistema, principalmente em sistemas de longa distância amplificados.

3.0 - PMD EM CABOS OPGW

Os cabos OPGW são cabos ópticos revestidos por fios metálicos trançados, que além da função de cabos pára-raios de linhas de alta tensão constituem meio de transporte para informações através das fibras ópticas instaladas em seu interior.

O cabo OPGW é constituído por fibras ópticas revestidas em acrilato, posicionadas em tubos preenchidos com gel, reunidos ao redor de um elemento central dielétrico protegido por fitas de enfaixamento, tubo de alumínio e uma ou duas camadas de fios metálicos. Os fios metálicos podem ser de alumínio, liga de alumínio ou de aço galvanizado.

Quando em operação o cabo OPGW apresenta um alongamento de seu comprimento devido ao seu peso que pode variar conforme a temperatura de operação. Este alongamento em relação à posição normal define uma flecha no meio do vão, que é a distância vertical deslocada pelo cabo. O cabo pode também estar sujeito a vibrações eólicas durante sua operação.

Teoricamente por estar sujeito diretamente aos efeitos naturais o cabo OPGW parece ser um candidato natural a apresentar altos valores da PMD. De fato estudos já realizados em cabos antes da instalação e posteriormente instalados sugerem um aumento do valor da PMD [5]. Este aumento já foi provado experimentalmente em campo [6] sendo atribuído ao efeito fotoelástico tal como stress assimétrico unidirecional ou da elongação da fibra devido ao aumento de temperatura.

Centenas de medições de PMD foram já realizadas em fibras de cabos ópticos OPGW instalados no Brasil para comissionamento dos sistemas de transmissão. A Fundação CPqD tem realizado medições de PMD, além de medições de dispersão cromática, atenuação e mistura de quatro ondas em cabos OPGW no Brasil desde 1997. A Figura 5 mostra os resultados de frequência acumulada da PMD para medições feitas pelo CPqD até o ano de 2001 em 62 enlases de fibras ópticas, o que equivale a 6.250 km de fibras instaladas.

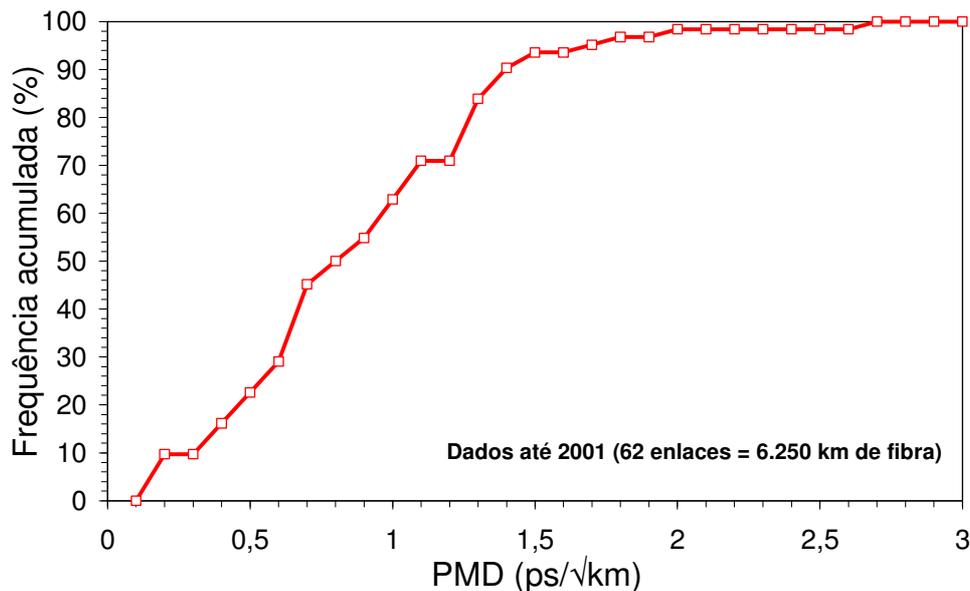


Fig. 5 – Frequência acumulada da PMD em medições de PMD realizadas no Brasil em cabos OPGW pelo CPqD até 2001.

De acordo com a Figura 5 até 2001 pelo menos 22,2% das fibras medidas a PMD era menor ou igual a $0,5 \text{ ps/km}^{1/2}$, e em pelo menos 10% a PMD era menor ou igual a $0,2 \text{ ps/km}^{1/2}$. Considerando os coeficientes máximos de PMD permitidos para 10, 40 e 100 Gb/s ($0,5$, $0,125$ e $0,05 \text{ ps/km}^{1/2}$) em um sistema DWDM de 400 km para as fibras instaladas até aquele período pouquíssimas fibras eram disponíveis para sistemas em 10 Gb/s e nenhuma fibra para sistemas acima desta taxa.

Porém após o ano de 2001 as empresas de transmissão de energia detentoras dos cabos OPGW investiram em uma das soluções para o problema da PMD (como mostraremos na próxima seção deste artigo) que é o da instalação de fibras com valores baixos de PMD de acordo com a referência [4]. A Figura 6 mostra os resultados de frequência acumulada da PMD para medições feitas pelo CPqD até o ano de 2008 em 662 enlases de fibras ópticas, o que equivale a 65.000 km de fibras instaladas.

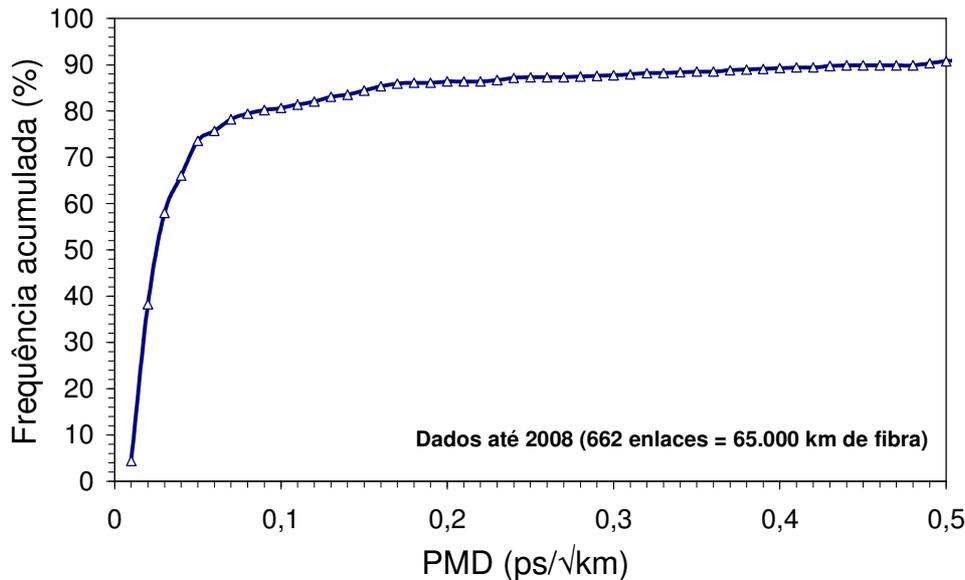


Fig. 6 – Frequência acumulada da PMD em medições de PMD realizadas no Brasil em cabos OPGW pelo CPqD até 2008.

Considerando os coeficientes máximos de PMD permitidos para 10, 40 e 100 Gb/s (0,5, 0,125 e 0,05 ps/km^{1/2}) em um sistema DWDM de 400 km então de acordo com a Figura 6 pelo menos 90,8% das fibras medidas a PMD é menor ou igual a 0,5 ps/km^{1/2}, em pelo menos 82% a PMD é menor ou igual a 0,125 ps/km^{1/2} e em pelo menos 73,5% das fibras medidas a PMD é menor ou igual a 0,05 ps/km^{1/2}. Ou seja aparentemente as fibras dos cabos OPGW instalados no Brasil atualmente encontram-se em boa situação para uso de taxas de transmissão de até 100 Gb/s.

A referência [7] mostra outros resultados de medições feitas até 2005. Neste caso em pelo menos 70% das fibras medidas a PMD é menor ou igual a 0,5 ps/km^{1/2} e em pelo menos 45% a PMD é menor ou igual a 0,125 ps/km^{1/2}.

4.0 - SOLUÇÕES PARA PMD

Diversas soluções tem sido pesquisadas para mitigar o problema da PMD. As soluções mais conhecidas são:

- A) Instalar novos cabos ópticos com fibras com baixos valores de PMD;
- B) Descobrir e trocar trechos de cabos com altos valores de PMD;
- C) Reemendar diferentes seqüências de fibras ao longo do enlace para obter uma concatenação de fibras com menor valor da PMD;
- D) Diminuir os comprimentos de enlaces entre regeneradores eletrônicos e, portanto usar mais regeneradores eletrônicos;
- E) Limitar a taxa de transmissão;
- F) Usar compensadores de PMD;
- G) Utilizar novos formatos de modulação de sinal;
- H) Utilizar códigos corretores de erros mais potentes.

As soluções A, B e C são as mais indicadas para as empresas de transmissão de energia elétrica proprietárias dos cabos OPGW e as soluções de D a H estão relacionadas às empresas fabricantes dos equipamentos de transmissão.

Basicamente a solução do tipo A consiste na instalação de cabos OPGW com fibras de melhor qualidade, dado que existe um esforço dos fabricantes de fibra na melhoria do processo de fabricação tendo em vista a obtenção de baixos valores de PMD. A referência [4] contém estas recomendações que basicamente são: para cabos com fibras do tipo G.652A e G.652C o máximo valor da PMD (igual a 3x o valor médio) é igual a 0,5 ps/km^{1/2} e para cabos com fibras G.652B e G.652D o máximo valor da PMD é igual a 0,2 ps/km^{1/2}. As letras A, B, C e D para as fibras monomodo padrão referem-se ao parâmetro dispersão cromática destas fibras.

A solução B consiste na utilização de uma tecnologia de rastreamento de seções do cabo com altos valores de PMD conhecida como POTDR [8]. Atualmente apenas um fabricante de equipamentos de medições de fibras detém esta tecnologia.

Uma vez localizados os trechos com valores altos de PMD pode-se programar para a substituição deste trecho. Ocorre na prática, no entanto que os altos valores de PMD podem estar distribuídos ao longo do várias seções de cabos, como pode ocorrer também no melhor caso de os altos valores de PMD estarem concentrados em apenas alguns trechos de cabos OPGW. Esta técnica tem sido testada tanto pelo fabricante como pelo CPqD porém apenas de forma exploratória.

A solução C é parecida com a solução B, porém não envolve a troca de cabos. Para a realização da mesma são abertas algumas caixas de emendas de fibras cuja localização é minuciosamente estudada. Após a quebra da

emenda óptica de algumas fibras medem-se os valores de PMD para ambos os lados do enlace rompido. Escolhem-se as melhores fibras dos dois lados e promove-se a emenda novamente. Este procedimento pode ser novamente realizado em outras caixas de emenda até que os valores de PMD necessários para a viabilização sistêmica do enlace sejam atingidos.

Esta técnica tem como vantagem a possibilidade de obtenção dos valores de PMD necessários sem a troca do cabo, porém tem os transtornos de abertura de caixas de emendas e da quebra na ordem das emendas previamente utilizadas.

A solução D que preconiza a diminuição do comprimento dos enlaces entre os repetidores eletrônicos permite que os sinais eventualmente deteriorados pela PMD sejam regenerados antes que taxas de erros significativas sejam atingidas. Porém o uso desta solução implica em custos maiores para o sistema de transmissão dado que os sinais DWDM devem ser abertos em todas as seções de regeneração.

A solução E que é uma solução que implica no uso de taxas de transmissão adequadas aos valores de PMD das fibras do cabo é uma solução simples, mas impede o crescimento de tráfego ou das taxas de transmissão ao longo do tempo.

A solução F implica no uso de compensadores de PMD que são dispositivos ativos ou passivos bastante complexos. Atualmente existem soluções comerciais de compensação de PMD [9] para um determinado canal DWDM, mas não para todos simultaneamente o que implica em altos custos de compensação para os canais DWDM.

As soluções G e H implicam na mudança da tecnologia de transmissão dos terminais através da mudança do formato de modulação do sinal óptico e/ou do uso de tecnologias de correção de erros (FEC) mais potentes. O uso de novos formatos de modulação permite a redução da largura de banda do sinal transmitido pela mesma quantidade de informações transmitidas, ou em outras palavras o aumento do número de bits por Hz. Entre os novos formatos de modulação candidatos a serem usados para minimizar o problema da PMD têm-se o RZ (Return to Zero), o DPSK (Differential Phase Shift Keying) [10], o DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), entre outros entre outros [11].

Os códigos corretores de erro permitem a correção dos sinais degenerados pela PMD. Entre os códigos corretores de erros mais potentes têm-se o Super-FEC/Double Stage FEC [10-11] que fornece um ganho de até 10 dB na relação sinal-ruído óptico do sinal.

Alguns trabalhos publicados mostram comparações econômicas qualitativas [12] e quantitativas [13] sobre o uso destes métodos de mitigação da PMD. A Figura 7 mostra uma comparação qualitativa adaptada da referência [12] e acrescidos de outros métodos descritos neste artigo. Como pode ser observada nesta figura a opção de maior custo seria a opção (A), ou seja, instalar novos cabos ópticos com fibras com baixos valores de PMD, porém esta opção é a que tem maior funcionalidade já que as novas fibras apresentam valores de PMD adequados às novas taxas de transmissão. Esta parece ser a opção adotada pelas empresas de transmissão de energia elétrica. Por outro lado as opções F (Usar compensadores de PMD) e G (Utilizar novos formatos de modulação de sinal) apresentam também boas funcionalidades, porém a um custo muito mais atraente. Estas opções são as mais adotadas pelos fabricantes de equipamentos de transmissão. A outra opção ainda de interesse das empresas de transmissão de energia elétrica é a opção B (Descobrir e trocar trechos de cabos com altos valores de PMD), que depende significativamente da distribuição das fibras com altos valores de PMD ao longo do cabo OPGW. Assim, se as fibras no cabo tem trechos com altos valores de PMD localizados, a substituição destes trechos de cabo corrige o problema a baixo custo, entretanto se a fibra tem alta PMD distribuída por toda extensão do cabo, todo o cabo deve ser substituído (como na opção A) com um alto custo.

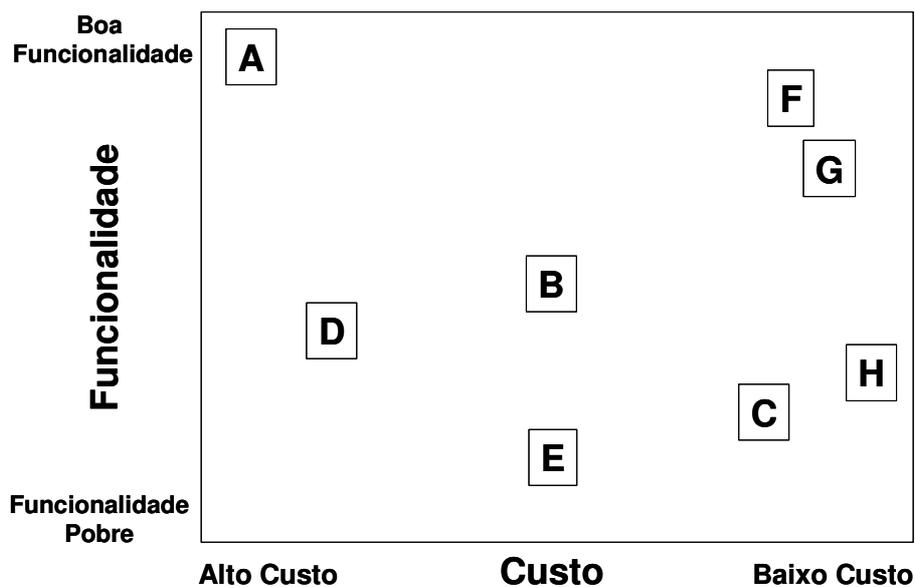


Fig. 7 - Comparação econômica qualitativa adaptada de [12] sobre o uso destes métodos de mitigação da PMD.

5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o efeito da PMD em sistemas ópticos com ênfase em sistemas que fazem uso de cabos OPGW mostrando a estatística dos valores da PMD de cabos instalados no Brasil, seus efeitos sistêmicos e as alternativas tecnológicas para solução do problema sejam do ponto de vista do fabricante do sistema, como do ponto de vista das empresas proprietárias do cabo OPGW. Considerando os resultados de medições de PMD realizadas nos últimos anos nas fibras ópticas dos cabos OPGW instalados no Brasil aparentemente estas fibras encontram-se em boa situação para uso de taxas de transmissão de até 100 Gb/s.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Xia, T.J. et al, "Transmission of 107-Gb/s DQPSK over Verizon 504-km Commercial LambdaXtreme Transport System", Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC, 2008.
- [2] IEC, "Polarization Mode Dispersion", http://www.iec.org/online/tutorials/polar_mode/index.asp, acessado em 15 janeiro de 2009.
- [3] ITU-T, "G.691 - Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers", Março 2006.
- [4] ITU-T, "G.652 Characteristics of a single-mode optical fibre and cable", Março 2003.
- [5] G. Vilela de Faria, M. R. Jimenez, and J. P. von der Weid, "PMD Variations From Factory to Field in OPGW Cabled Fibers", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18, No. 1, Janeiro, 2006.
- [6] Y. Namihira, W. Yamasak, N. Zou, L. V. Massawe, K. Miyagi, T. Arakaki, E. Ikemiyagi, and M. Toma, Simultaneous Measurements of PMD, Chromatic Dispersion and Polarization Fluctuations in Actual OPGW", Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC, paper NWD4, 2005.
- [7] S. Barcelos, T. Serra, R. F. Rando, E. L. Rigon, N. Sasaki, W. Arellano, A. Alkschbirs, D. Lima, R. Oliveira, "Polarization Mode Dispersion (PMD) Field Measurements: Audit of Newly Installed Fiber Plants", Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC, paper NThC3, 2005.
- [8] A.B. Conibear, F.J. Visser, F. Audet, R. Salmi,; A.W.R. Leitch, "Locating high PMD sections of an overhead cable using polarization-OTDR", Technical Digest: Symposium on Optical Fiber Measurements, Pags. 103-106, 2004.
- [9] OTS 4540 PMD Compensator, <http://www.opnext.com/products/subsys/OTS4540.cfm> acessado em 15 janeiro de 2009.
- [10] OTS 4040 DPSK Transponder <http://www.opnext.com/products/subsys/OTS4040DPSK.cfm> acessado em 15 janeiro de 2009.
- [11] P. J. Winzer, R.J. Essiambre, "Advanced Optical Modulation Formats", Proceedings of the IEEE, Vol. 94, No. 5, Pags. 952-985, Maio, 2006.
- [12] W. Weiershausen, D. Breuer, "PMD as Bottleneck Problem for the Introduction of 40Gbit/s and Future 100Gbit/s Ethernet into German WDM Backbone", Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC, Workshop: 40Gb/s Networks and the PMD Challenge, 2007.
- [13] R. Saunders, "Techno-economic considerations for managing real world installed fiber plant PMD", Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC, Workshop: 40Gb/s Networks and the PMD Challenge, 2007.