Dissertação de Mestrado

Inatel
Instituto Nacional de Telecomunicações

LIMITES IMPOSTOS PELA DISPERSÃO POR MODO DE POLARIZAÇÃO EM SISTEMAS ÓPTICOS DE ELEVADA TAXA DE TRANSMISSÃO

ANDRÉ LUIS DA ROCHA ABBADE

AGOSTO/ 2008

LIMITES IMPOSTOS PELA DISPERSÃO POR MODO DE POLARIZAÇÃO EM SISTEMAS ÓPTICOS DE ELEVADA TAXA DE TRANSMISSÃO

ANDRÉ LUIS DA ROCHA ABBADE

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Antônio Justino Ribeiro

Santa Rita do Sapucaí
2008

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em _____ /_____ /_____ ,
pela comissão julgadora:

_____

(Prof. Dr. José Antônio Justino Ribeiro / DTE - INATEL)

_____

(Prof. Dr. Mauricio Silveira / PUC - Campinas)

_____

(Prof. Dr. Adonias Costa da Silveira / INATEL)

_____

Coordenador do Curso de Mestrado

Para minha esposa, Márcia e meu filho, Lucas,

pelo amor, apoio e paciência, nas noites e finais de semana que foram dedicados a este trabalho, preparando esta dissertação.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Antônio Justino Ribeiro pela atenção, paciência, competência e sabedoria que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Maurício Silveira pelos conselhos e contribuições que enriqueceram este trabalho.

Aos alunos de iniciação científica, Lucas Faria e Souza Vilela, Josias de Lima Bernardes e Breno Luiz Lima Santos que, como orientados e colaboradores em nosso trabalho, auxiliaram na realização de diversas simulações e muito contribuíram para que esta dissertação fosse elaborada.

Aos meus pais que souberam me educar com bons valores e sempre enfatizaram a importância do estudo contínuo.

ÍNDICE

Lista de figuras. I
Lista de tabelas. IV
Lista de símbolos. V
Lista de abreviaturas e siglas. VIII
Resumo. IX
Abstract. X
Capítulo 1 - Apresentação do Trabalho 1
1.1 - Introdução 1
1.2 - Motivação para o estudo 3
1.3 - Proposta para o desenvolvimento. 4
Capítulo 2 - Análise da transmissão na fibra óptica 5
2.1 - Propagação da onda eletromagnética na fibra óptica 5
2.2 - Solução da equação de onda 7
2.3 - Velocidade de fase 8
2.4 - Velocidade de grupo 8
2.5 - Índice de refração 10
2.6 - Redução na amplitude do campo óptico guiado 10
2.7 - Interpretação do feixe guiado segundo a óptica geométrica 12
2.8 - Modos guiados na fibra óptica 14
Capítulo 3 - Dispersões na fibra óptica 18
3.1 - Conceituação do fenômeno da dispersão 18
3.2 - Tipos relevantes de dispersão na fibra óptica 21
a- Dispersão modal 21
a- Dispersão cromática 21
a- Dispersão por modo de polarização 27
3.3 - Compensação de dispersão cromática 27

Capítulo 4 - Dispersão por modo de polarização 31
4.1 - Meios com dupla refração 31
4.2.- Propagação de ondas eletromagnéticas na matéria 31
4.3 - Propagação de ondas planas em cristais anisotrópicos..... 35
4.4 - Conseqüência da birrefringência sobre a polarização 39
4.5 - Limites recomendados..... 40
Capítulo 5 - Simulações computacionais 46
5.1 - Características e propriedades do programa de simulação..... 46
5.2 - Simulações para a taxa de transmissão de 2,5Gb/s. 50
5.3 - Simulações para a taxa de transmissão de 10Gb/s. 51
5.4 - Simulações para a taxa de transmissão de 40Gb/s. 53
5.5 - Simulações para a taxa de transmissão de 20Gb/s e 80Gb/s. 55
Capítulo 6 - Comentários finais 60
6.1 - Observações gerais 60
6.2 - Comentários sobre o trabalho 61
6.3 - Conclusões e novas propostas 62
Anexo 1 - Resultados das simulações 64
Anexo 2 - Trabalhos publicados relacionados à dissertação. 87
Referências bibliográficas. 88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - (a) Vista longitudinal e (b) em corte transversal de uma fibra óptica, apresentando o núcleo e a casca, sem as suas camadas de proteção.....6

Figura 2.2 - Decomposição do raio transmitido no núcleo para uma fibra de índice degrau. Os valores indicados referem-se a parâmetros envolvidos na solução da equação de onda.....6

Figura 2.3 - Grupo formado por duas componentes senoidais com freqüências próximas....9

Figura 2.4 - Curva de atenuação da fibra em função do comprimento de onda. Identificam-se valores para os quais se têm pontos de mínima atenuação na fibra óptica 11

Figura 2.5 - Relação entre o ângulo de aceitação ϕ_1, medido na face de entrada da fibra óptica e o ângulo de incidência na interface do núcleo com a casca.....13

Figura 2.6 - Relação entre a constante de propagação normalizada *b* como função do diâmetro normalizado *V* para os modos LP.....17

Figura 3.1 - Seqüência temporal de bits transmitidos e recebidos com efeito da dispersão, podendo ocorrer interferência entre símbolos.....18

Figura 3.2 - Efeito do comprimento de onda sobre o valor do índice de refração para a sílica pura calculado de acordo com a fórmula de Sellmeier.....22

Figura 3.3 - Comparação entre os comportamentos do índice de refração do material e o índice de refração de grupo para a sílica pura.....23

Figura 3.4 - Corte longitudinal de um guia de onda, destacando o percurso de um modo guiado.....23

Figura 3.5 - Curva da dispersão cromática total para uma fibra monomodo padrão em função do comprimento de onda, além das curvas da dispersão do guia de ondas e da dispersão do material 26

Figura 3.6 - Curva da dispersão cromática total para uma fibra de dispersão deslocada não-nula em função do comprimento de onda, além das curvas da dispersão do guia de ondas e da dispersão do material.....26

Figura 0.7 – (a) Trecho de fibra com grade de Bragg. (b) Distribuição espectral do feixe óptico de entrada. (c) Representação espectral do comportamento da grade de Bragg. (d) Sinal óptico de saída, no domínio da freqüência.....29

Figura 3.8 - Modelo de utilização de grades de Bragg para compensar a dispersão cromática.....30

Figura 4.1 - Rotação da polarização no meio e atraso entre os modos de propagação.....34

Figura 4.2 - Direção arbitrária de propagação em um meio qualquer em que se estuda a birrefringência.....38

Figura 4.3 - Feixe de luz não-polarizada separado em dois outros por um cristal birrefringente.....39

Figura 4.4 - Limites impostos pela PMD para o STM-64 (10Gb/s) e para o STM-256 (40Gb/s) em função do comprimento do enlace.....42

Figura 4.5 - Limites impostos pela PMD para o STM-4 (622Mb/s) e para o STM-16 (2,5Gb/s) em função do comprimento do enlace.....43

Figura 4.6 - Relação entre a penalidade do receptor e a dispersão causada pela PMD em relação ao tempo de bit.....44

Figura 4.7 - 30 amostras nulas da taxa de erro de bit para uma taxa de transmissão de 40 Gb/s (STM-256), com $D_{PMD} = 0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ em 25km 45

Figura 5.1 – 1000 amostras da taxa de erro de bit para uma taxa de transmissão de 40 Gb/s (STM-256), com $D_{PMD} = 0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ em 196km, que corresponde a 28% do tempo de bit.....48

Figura 5.2 - 1000 amostras da taxa de erro de bit para uma taxa de transmissão de 40 Gb/s (STM-256), com $D_{PMD} = 0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ em 182,25km, que corresponde a 27% do tempo de bit.....49

Figura 5.3 - 1000 amostras da taxa de erro de bit para uma taxa de transmissão de 10 Gb/s (STM-64), com $D_{PMD} = 0{,}2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ em 15625km, que corresponde a 25% do tempo de bit.....53

Figura 5.4 - Segmento de reta que representa os resultados para a condição de $D_{PMD}R \geq 80 \cdot 10^{-3}\,\text{bit}/\sqrt{\text{km}}$ 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Correspondência entre os modos linearmente polarizados e os modos exatos dos quais eles são formados.....16

Tabela 3.1 - Valores dos coeficientes da formula de Sellmeier para a sílica pura.....22

Tabela 4.1 - Resultados experimentais relativos ao parâmetro D_{PMD} para três tipos diferentes de cabos ópticos.....41

Tabela 5.1 - Comprimentos máximos de enlaces calculados para a taxa de 2,5Gb/s 51

Tabela 5.2 - Taxa de erro de bit medida para 2,5Gb/s.....51

Tabela 5.3 - Comprimentos máximos de enlaces calculados para a taxa de 10Gb/s 52

Tabela 5.4 - Taxa de erro de bit medida para 10Gb/s.....52

Tabela 5.5 - Comprimentos máximos de enlaces calculados para a taxa de 40Gb/s 54

Tabela 5.6 - Taxa de erro de bit medida para 40Gb/s.....54

Tabela 5.7 - Comprimentos máximos de enlaces calculados para a taxa de 20Gb/s 55

Tabela 5.8 - Taxa de erro de bit medida para 20Gb/s.....56

Tabela 5.9 - Comprimentos máximos de enlaces calculados para a taxa de 80Gb/s.....56

Tabela 5.10 - Taxa de erro de bit medida para 80 Gb/s.....57

Tabela 5.11 - Limites de dispersão apresentados pelas simulações.....57

Tabela 5.12 - Limites de dispersão apresentados pelas simulações em função de $D_{PMD}R$...58

LISTA DE SÍMBOLOS

a raio do núcleo de uma fibra óptica

A_i coeficiente para determinação do índice de refração na fórmula de Sellmeier

b constante de propagação normalizada

$\hat{b}$ vetor unitário na direção de $\vec{\beta}$

$\vec{B}$ indução magnética.

c velocidade da luz no vácuo

$\vec{D}$ deslocamento elétrico

D_{DCF} coeficiente de dispersão da fibra de compensação

D_G dispersão de guia de onda

$D_{G\text{-}SM}$ dispersão de guia de onda para a fibra monomodo padrão

$D_{G\text{-}NZD}$ dispersão de guia de onda para a fibra de dispersão deslocada não-nula

D_M dispersão do material

D_{PMD} parâmetro de PMD da fibra

D_{ST} coeficiente de dispersão da fibra original

D_T dispersão cromática total

$\vec{e}$ valor instantâneo do vetor campo elétrico de uma onda eletromagnética

g parâmetro associado à variação radial do índice de refração do núcleo

$\vec{h}$ valor instantâneo do vetor campo magnético de uma onda eletromagnética

k constante de propagação da luz no vácuo

L comprimento do enlace

L_{DCF} comprimento da fibra de compensação de dispersão

L_{ST} comprimento da fibra de transmissão

N	índice de refração
N_c	índice de refração da casca
N_g	índice de refração de grupo
N_m	número de modos confinados no núcleo
N_n	índice de refração do núcleo
N_p	índice de refração de fase
P_{in}	potência inicial
P_{out}	potência final
r	coordenada radial
R	taxa de transmissão de bits do sistema
$\vec{r}$	vetor posição de um ponto genérico do espaço
$\vec{s}$	vetor de Pointing
T_b	tempo de bit do sinal
V	diâmetro normalizado
v_e	velocidade da energia
v_g	velocidade de grupo
v_p	velocidade de fase
$x\%$	percentual de dispersão em relação ao tempo de bit
z	coordenada longitudinal
α	fator de atenuação
β	fator de fase da onda guiada
β_d	fator de fase da onda dextrorrotatória
β_e	fator de fase da onda levorrotatória.

β_p fator de fase do campo resultante

β_t componente transversal do fator de fase

$\Delta\tau$ diferença nos resultados dos tempos de propagação dos dois modos de polarização

$\langle \Delta\tau \rangle$ valor médio das medidas de dispersão temporal

ε permissividade elétrica do meio

ε_r permissividade relativa do meio

θ_e argumento inicial do campo elétrico

θ_h argumento inicial do campo magnético

ϕ coordenada angular na fibra, azimute

ϕ_c ângulo crítico

ϕ_1 ângulo de incidência

ϕ_2 ângulo de refração

Λ período da grade de Bragg

λ comprimento de onda

λ_o comprimento de onda no vácuo

λ_B comprimento de onda de Bragg

μ permeabilidade magnética do meio

μ_r permeabilidade relativa do meio.

ψ função que descreve as componentes longitudinais do campo guiado

χ_m susceptibilidade magnética do meio

ω freqüência angular

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BER	taxa de erro de bit do sistema
Fibra DS	Fibra monomodo com dispersão deslocada (nulo na região de 1550 nm)
EDFA	Amplificador de fibra dopada com érbio
Modo EH	Modo híbrido com predomínio da componente do campo elétrico
Modo HE	Modo híbrido com predomínio da componente do campo magnético
ITU	União Internacional de Telecomunicações
NLS	Equação não-linear de Schrödinger
Fibra NZD	Fibra monomodo com dispersão deslocada não nula em 1550 nm
OTDR	Refletômetro óptico no domínio do tempo
PMD	Dispersão por modo de polarização
PPD	fotodiodo *pin*
SDH	Hierarquia digital síncrona
Fibra SM	Fibra monomodo padrão
STM	Synchronous transport module
Modo TE	Modo transversal elétrico
Modo TM	Modo transversal magnético
VPI	Virtual Photonics Inc.

RESUMO

Este estudo descreve os parâmetros relevantes no projeto de um sistema óptico de grande capacidade e auxilia no planejamento e implantação desse tipo de rede. São abordados os fatores que limitam a capacidade dos sistemas, tais como atenuação e dispersão. O foco principal está nos limites impostos pela dispersão por modo de polarização (PMD) para fibras do tipo monomodo, de ampla aplicação nas redes ópticas modernas. Baseado na Recomendação G.652 da União Internacional de Telecomunicações (ITU), faz-se uma comparação com simulações realizadas com a plataforma de análise e projetos da empresa Virtual Photonics Inc. (VPI). Os resultados, em alguns casos, são divergentes dos previstos. Assim, foi proposta uma nova forma de se calcular o limite teórico imposto pela PMD em sistemas de alta capacidade. Este modelo deverá ser avaliado por outros métodos, para confirmar sua coerência ou sofrer os ajustes necessários.

Palavras-chave: atenuação, dispersão, dispersão por modo de polarização (PMD).

ABSTRACT

This work makes a description of the parameters in the design of high capacity optical systems and help the planning and the implementation of these networks. It shows the factors that limit the system capacity, like attenuation and dispersion. The main focus is the limitation imposed by the Polarization Mode Dispersion (PMD) for the single mode fiber, with wide application in modern optical networks. Based at the G.652 Recommendation from the International Telecommunication Union (ITU), some comparisons of the limits were done with some simulations using a specific software by Virtual Photonics Inc. (VPI). The results, in some cases, have meaningful divergence. Thus, it is proposed a new model to check the theoretical limit imposed by the PMD in high capacity systems. This model should be checked by other methodology to confirm the coherence or to impose the necessary adjustments.

Key Words: Atenuation, Dispersion, Polarization Mode Dispersion (PMD)

Capítulo 1

APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1 Introdução

A tecnologia em comunicações ópticas tem crescido rapidamente nos últimos anos. Entre as várias conquistas, conseguiram-se avanços significativos no tipo de guias de ondas para as freqüências do infravermelho identificado como fibra óptica. Os modelos mais aperfeiçoados apresentam baixa atenuação, baixa dispersão e pequenos efeitos não-lineares. A aplicação dessas fibras em diversos setores da tecnologia da informação é muito difundida. Os sistemas ópticos aumentaram sua capacidade segundo taxas de cerca de 100 vezes por década, superando muito os sistemas eletrônicos mais tradicionais que empregam equipamentos com circuitos integrados. Atingiram-se transmissões de dezenas de gigabits por segundo, sendo o limite determinado principalmente pelo processamento eletrônico do sinal de modulação. Com a *multiplexagem em comprimentos de onda* (*WDM*), ampliou-se ainda mais a capacidade de transmissão, mesmo com as limitações das interfaces eletrônicas, possibilitando o emprego de taxas de terabits por segundo em uma única fibra, [1] [2].

Nos primeiros sistemas ópticos, deu-se ênfase à atenuação causadora da redução de potência, assim como à dispersão, que leva ao alargamento temporal do sinal transmitido. Os sistemas foram otimizados para comprimentos de onda referentes à primeira e segunda janelas de baixas perdas nas fibras à base de sílica (850nm e 1,3μm). Na região em torno de 1,3μm a fibra monomodo padrão (SM) apresenta dispersão intramodal mínima, [3]. Esse comprimento de onda passou a ter grande rele-

vância, permitindo grande aumento na capacidade do sistema. Com o aperfeiçoamento dos amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFA), operando na janela de 1,55μm, os repetidores eletrônicos têm sido substituídos nesta janela, região de atenuação mínima. Neste caso, a dispersão é muito alta na fibra SM, tendo valores na ordem de 17ps/nm·km, com grande redução na capacidade de transmissão, [1].

Foram desenvolvidas *fibras com dispersão deslocada*, referidas como fibras DS (*Dispersion Shifted Fiber*), que operam com dispersão nula em comprimentos de onda próximos de 1550nm. Embora essa fibra possa parecer a ideal, devem ser considerados os *efeitos não-lineares* na condição de dispersão nula, com suas conseqüências sobre a transmissão, [4]. Desta forma, desenvolveram-se fibras de dispersão deslocada com dispersão não-nula em 1550nm, referida como NZD (*Non Zero Dispersion Shift Fiber*). Esse tipo mantém uma dispersão pequena, estabelecendo um compromisso entre a dispersão e os efeitos não-lineares. Ambos ocorrem em 1550nm, porém com dispersão não tão grande quanto na fibra SM e efeitos não-lineares não tão significativos quanto na fibra DS, [5].

Outra questão relevante é a *dispersão por modo de polarização* (PMD – *Polarization Mode Dispersion*), praticamente desconsiderada quando as taxas de transmissão eram inferiores a 1 Gb/s. Para portadoras moduladas em 10 Gb/s ou superiores, a penalidade causada pela PMD ao sistema é grande e precisa ser avaliada para garantir a qualidade e a disponibilidade do sistema óptico. Na maior parte das redes ópticas instaladas, os cabos contêm fibras ópticas do tipo monomodo, que obedecem a recomendação G.652 da ITU-T, [3] [5]. As que não forem utilizadas em um cabo óptico são conhecidas como *fibras apagadas* ou *fibras escuras.* Isto ocorre porque as empresas responsáveis pelos projetos de redes ópticas devem prever as necessidades futuras da rede e deixam-se fibras de reserva para os sistemas em operação. Essas fibras integrarão este estudo e alguns de seus parâmetros precisam ser verificados. A não avaliação desses parâmetros poderá implicar em falhas na operação ou até a não-operação do sistema.

1.2 Motivação para o estudo

As fibras escuras nos cabos ópticos instalados sofrem continuas interferências do meio externo, provocadas por variações de temperatura, esforços mecânicos, intervenções para modificações de projeto ou para correção de problemas causados por acidentes. Estes fatores podem alterar suas características geométricas e modificar as condições de propagação do feixe óptico do sistema. Quanto maiores forem as alterações nas características geométricas da fibra, maior será a dispersão por modo de polarização do enlace. Em cabos aéreos, os esforços provocados nos pontos de fixação dos cabos pelo vento, pela chuva e por variações de temperatura, podem modificar a estrutura cilíndrica da fibra.

Em cabos do tipo OPGW (optical ground wire) que são cabos pára-raio instalados acima de linhas de transmissão de energia elétrica e possuem fibras ópticas em seu interior, a situação é ainda mais significativa. Nos cabos em dutos ou enterrados, as variações de temperatura e esforços mecânicos geralmente são menores e podem ser minimizados se na fase de projetos e na instalação tomarem-se alguns cuidados com a identificação dos cabos, sinalização próxima ao cabo e, principalmente, com a acomodação deste em toda a extensão do enlace. Sempre que possível, evita-se a passagem dos cabos por áreas onde a probabilidade de obras ou intervenções futuras sejam eminentes.

Para atender aos limites operacionais de dispersão, testam-se todas as fibras disponíveis e verificam-se seus valores de PMD. Recomendam-se medidas contínuas por, pelo menos, 24 horas para que sejam observadas as condições mais adversas de temperatura, registrando-se o maior valor medido em cada fibra. Estudos em fibras de cabos instalados mostram que apresentam valores acima dos recomendados. Se no planejamento as medidas em campo não forem realizadas o sistema poderá não apresentar o resultado esperado, uma vez que o projeto teria sido feito apenas com base nas recomendações. Considerando-se o alto custo dos equipamentos para a realização destas medidas, deve-se tomar o cuidado de não recomendar indiscriminadamente a sua realização. Neste trabalho, estudam-se os efeitos da dispersão por modo de polarização em fibras monomodo para sistemas de alta capacidade e avaliam-se os cuida-

dos necessários no planejamento desses projetos, definindo-se em quais situações estas medidas serão imprescindíveis.

1.3 Proposta para o desenvolvimento

Serão descritos os parâmetros relevantes no projeto de um sistema óptico de grande capacidade que auxiliam em seu planejamento e em sua implantação. Abordam-se os fatores que impõem limites para os sistemas, como a atenuação e a dispersão. O foco principal é avaliar os limites impostos pela PMD nas fibras monomodo. O trabalho está organizado na maneira descrita a seguir:

O Capítulo 2 descreve os fatores que contribuem para a atenuação e o capítulo 3 apresenta a dispersão cromática, com informações sobre duas técnicas para a compensação de seus efeitos. O Capítulo 4 é dedicado à PMD, mostrando fundamentos do efeito e sua influência sobre a forma do pulso transmitido.

O Capítulo 5 apresenta uma avaliação dos limites teóricos da PMD, recomendados pela União Internacional de Telecomunicações (ITU), e faz uma comparação com simulações realizadas através da plataforma de análise e projetos da empresa Virtual Photonics Inc. (VPI). Os resultados, em alguns casos, são divergentes dos estabelecidos pela ITU na Recomendação G.652, [3]. A partir dessas divergências, foi proposta uma nova forma de se calcular o limite teórico imposto pela PMD em sistemas de alta capacidade.

O Capítulo 6 são comentários e conclusões, sugerindo uma avaliação das simulações do Capítulo 5 com outro programa computacional. Sugerem-se testes práticos para ratificar as conclusões e propor nova recomendação aos orgãos de normatização. Em anexo, mostram-se trabalhos publicados relacionados a este estudo e apresentam-se simulações que levaram aos valores das tabelas do Capitulo 5.

Capítulo 2

ANÁLISE DA TRANSMISSÃO NA FIBRA ÓPTICA

2.1 Propagação da onda eletromagnética na fibra óptica

Em uma estrutura cilíndrica de secção transversal circular o campo eletromagnético guiado é obtido com a solução da equação de onda nas coordenadas apropriadas, descritas em termos da coordenada radial r e da coordenada azimutal ϕ. Partindo do método de separação de variáveis, é possível obter a equação de onda em termos da componente longitudinal do campo guiado. Desta componente, obtém-se as distribuições possíveis do campo no plano transversal, que definem os modos de propagação. Para campos que variem harmonicamente no tempo, todas essas componentes são encontradas a partir da solução de:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial\phi^2}+(N^2k^2-\beta^2)\psi=0 \qquad (2.1)$$

sendo ψ uma função que descreve a componente longitudinal, considerada como o eixo z, coincidente com a direção resultante de propagação. O fator N indica o *índice de refração* em cada região, definido em termos das características eletromagnéticas do meio, [6]. O fator k é o número de onda, associado à freqüência e às propriedades eletromagnéticas do vácuo.

A fibra óptica é uma estrutura cilíndrica nos moldes que permitem o emprego desta equação. É constituída por dois materiais concêntricos, um núcleo com índice de refração N_n e uma casca com índice de refração N_c (Figura 2.1). Será demonstrado que as condições para o confinamento do campo exigem que o índice de refração do

núcleo seja maior do que o da casca. Na hipótese de ambos os valores serem constantes ao longo do raio da estrutura tem-se o tipo denominado *fibra com índice em degrau* e será a estrutura considerada nas análises. Existem modelos em que o índice de refração do núcleo depende da distância a contar de seu centro e representa a *fibra com índice gradual*, [6]. A sílica é o material básico em sua fabricação por apresentar boa qualidade de transmissão nos comprimentos de onda de interesse para os sistemas modernos de comunicações ópticas e pela facilidade de obtenção em escala industrial, [7]. As coordenadas envolvidas na equação de onda estão na Figura 2.2.

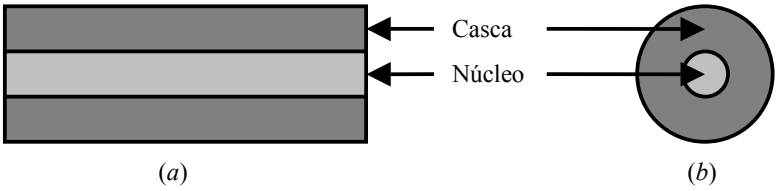


Figura 2.1 - *(a)Vista longitudinal e (b) em corte transversal de uma fibra óptica, apresentando o núcleo e a casca, sem as suas camadas de proteção.*

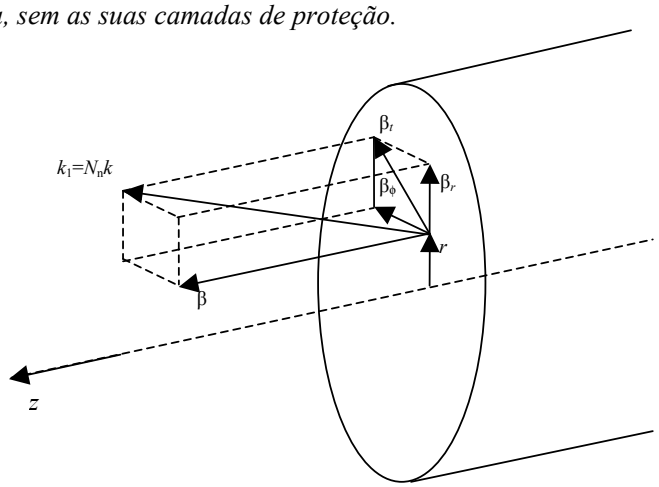


Figura 2.2 – *Decomposição do raio transmitido no núcleo para uma fibra de índice degrau. Os valores indicados referem-se a parâmetros envolvidos na solução da equação de onda.*

Com o aperfeiçoamento das tecnologias de fabricação, fibras apresentadas a partir de 1974 passaram a ter perdas na transmissão do feixe óptico muito pequenas. Identificaram-se comprimentos de onda privilegiados em torno de 850nm (primeira janela de baixa atenuação), com perdas abaixo de 3dB/km, inferiores a 0,5dB/km para transmissão em 1.300nm (segunda janela) e 0,25dB/km em comprimentos de onda por volta de 1.550nm (terceira janela). A perda mínima estimada para a sílica é

da ordem de 0,18dB/km na terceira janela, fato devido principalmente ao efeito conhecido como dispersão de Rayleigh, discutida mais adiante, [5] [7].

2.2 Solução da equação de onda

Para uma onda eletromagnética com variação harmônica no tempo, propagando-se na direção +*z*, em qualquer instante e em qualquer posição do espaço, os campos elétrico e magnético obtidos da solução da equação de onda estão de acordo com:

$$\vec{e} = \vec{E}_0(r,\phi)\, e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta_e)\ \text{V/m} \tag{2.2}$$

$$\vec{h} = \vec{H}_0(r,\phi)\, e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \theta_h)\ \text{A/m} \tag{2.3}$$

Os valores de $\vec{E}_0$ e $\vec{H}_0$ são as amplitudes no plano $z = 0$, α é o fator de atenuação em nepers por metro, ω é a freqüência angular em radianos por segundo e β é o fator de fase, expresso em radianos por metro. Os ângulos θ_e e θ_h mostram os argumentos iniciais dos campos elétrico e magnético, [7].

Estas condições são válidas para a transmissão de uma luz monocromática, somente possível de ser obtida de uma fonte ideal. Modernamente, encontram-se diodos laseres para comunicações que se aproximam desta condição. Existem dispositivos com tecnologias especiais de fabricação que apresentam larguras espectrais de centésimos de nanometros em comprimentos de onda na segunda e na terceira janelas da fibra óptica, [8] [9] [10]. Assim, não se cometem erros grosseiros admitindo portadoras ópticas com a representação de (2.2) e (2.3).

A orientação do campo elétrico define a polarização da onda, que terá relevância no comportamento da luz guiada na fibra. Em substâncias homogêneas e isotrópicas, os efeitos de polarização elétrica e magnetização em átomos e moléculas pela onda eletromagnética implicam o emprego das correspondentes permissividade elétrica ε e permeabilidade magnética μ do material. A velocidade de propagação deve ser interpretada sob três pontos de vista, a velocidade de fase, a velocidade de grupo e a velocidade da energia. São determinadas respectivamente por:

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (a) \quad v_g = \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega}\right)^{-1} \quad (b) \quad v_e = \frac{ds}{dt} \quad (c) \tag{2.4}$$

onde *ds* é o deslocamento elementar da energia no intervalo de tempo *dt*. Se os meios forem isotrópicos, sem perdas, não-dispersivos e infinitos, os três valores coincidem, quando referidos à mesma direção:

$$v_p = v_g = v_e = 1/\sqrt{\varepsilon \mu} \tag{2.5}$$

2.3 Velocidade de fase

O lugar geométrico dos pontos de mesma fase da onda que se propaga no meio é denominado *frente de onda* e sua superfície pode ser descrita por

$$\varphi(t,z) = \omega t - \beta z = \text{constante} \tag{2.6}$$

em que a constante representa um argumento em radianos. Para satisfazer esta condição, o valor de *z* cresce à medida que o tempo passa, representando o deslocamento dessa frente de onda. A rapidez do seu movimento é a *velocidade de fase*. Derivando os dois membros da equação anterior em relação ao tempo, tem-se

$$\omega - \beta(dz/dt) = 0 \tag{2.7}$$

O fator entre parênteses representa o deslocamento por unidade de tempo, que é a velocidade da frente de onda. Portanto,

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \tag{2.8}$$

Em uma onda guiada, mesmo em condições ideais de meios sem perdas, este parâmetro é dependente do comprimento de onda, através do valor de β.

2.4 Velocidade de grupo

Considerando que os transmissores dos sistemas ópticos não possuem fontes de luz monocromáticas, torna-se necessária a verificação do comportamento conjunto das diversas frentes de onda transmitidas simultaneamente, de modo que a combi-

nação de seus valores resulta em uma pequena largura de faixa de transmissão, também conhecida como *largura espectral*. Como os valores são bem próximos, as interferências darão origem a um sinal obtido da soma de componentes quase em fase (interferência construtiva), passando por defasagens progressivamente maiores, até um ponto de componentes quase em contrafase (interferência destrutiva). O sinal composto possui uma velocidade de propagação denominada *velocidade de grupo*, considerada como a rapidez de deslocamento de todo o conjunto, com sua forma preservada. Em estruturas que comportem ondas guiadas, o grupo é formado por superposições de ondas incidentes e refletidas, mesmo que se tenha uma onda eletromagnética perfeitamente harmônica no tempo.

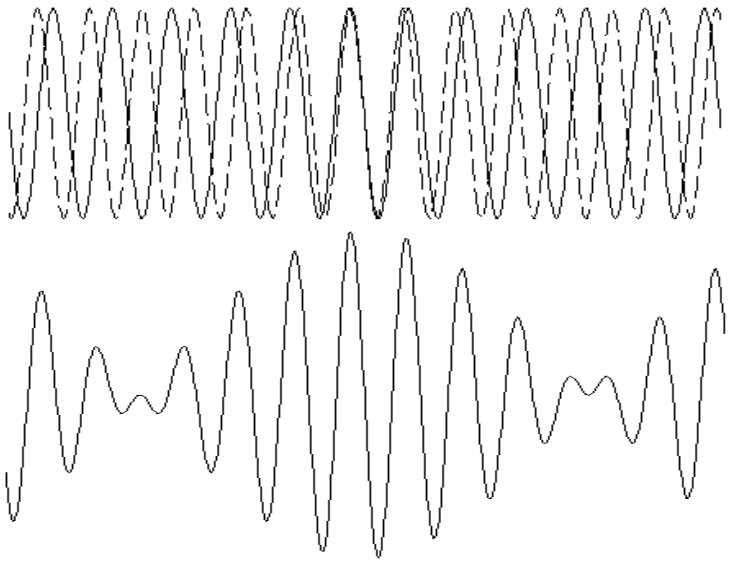


Figura 2.3 - *Grupo formado por duas componentes senoidais com freqüências próximas*, [6].

A Figura 2.3 apresenta um grupo formado por duas componentes senoidais com freqüências próximas. A envoltória do sinal composto apresenta picos quando ocorrer interferência construtiva e valores reduzidos em interferências destrutivas. Tomando-se uma amplitude resultante como referência, o seu deslocamento por unidade de tempo determina a velocidade de grupo. É obtida pelo inverso da derivada de variação do fator de fase com a freqüência angular, [7]. Ou seja,

$$v_g = \left[\frac{\partial \beta}{\partial \omega}\right]^{-1} \tag{2.9}$$

que pode ser maior, menor ou igual a velocidade de fase, dependendo da lei de variação do fator de fase com a freqüência. Em estruturas de ondas guiadas, seu valor é menor e coincide com o deslocamento de energia por unidade de tempo.

2.5 Índice de refração

A razão entre a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo, *c*, e no meio especificado, *v*, é o *índice de refração absoluto*, designado por *N*. Então,

$$N = \frac{c}{v} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \mu_o}} \sqrt{\varepsilon\mu} = \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon_o \mu_o}} = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \qquad (2.10)$$

sendo $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_o$ e $\mu_r = \mu/\mu_o$ a permissividade e a permeabilidade relativas do material. Seu valor deve ser obtido para as diferentes velocidades no meio de propagação. Assim, identificam-se os índices de refração relativos à velocidade de fase e à velocidade de grupo:

$$N_p = \frac{c}{v_p} \quad (a) \qquad N_g = \frac{c}{v_g} \quad (b) \qquad (2.11)$$

2.6 Redução na amplitude do campo óptico guiado

Na solução da equação de onda, indentifica-se o fator responsável pela redução da amplitude do campo guiado com a distância, indicando a perda de potência na propagação ao longo da fibra óptica. Seu valor é influenciado pelas características construtivas dos diversos componentes do enlace óptico. Na fibra, será resultado da contribuição dos seguintes fatores: absorção pelo material, irradiação devido a curvaturas, espalhamento pelo material, espalhamento da onda guiada, perdas por modos vazantes, perdas por microcurvaturas e macrocurvaturas, perdas em emendas e conectores, por acoplamento no inicio e no final da fibra e redução da potência provocada por dispersão do sinal, [7]. Essas perdas são relacionadas à qualidade de fabricação da fibra, ao comprimento da onda guiada, ao grau de pureza do material utilizado e à qualidade das emendas e conectores. O fator de atenuação resultante da equação de onda, expressa em (2.2) e (2.3), é dado em nepers por metro. Em situações práticas, costuma ser especificado em decibels por metro (dB/m) ou, por causa das grandes extensões envolvidas, em decibels por quilômetro. Para uma estrutura uni-

forme, com potência inicial P_{in} e valor final P_{out}, a uma distância L (km) da origem, é, [2] [11].

$$\alpha(\mathrm{dB/km}) = \frac{10}{L}\,\ell og\,\frac{P_{in}}{P_{out}} \tag{2.12}$$

As perdas causadas por impurezas e imperfeições podem ser minimizadas no processo de fabricação e instalação, enquanto as perdas do material são intrínsecas a ele e determinadas pela tecnologia de fabricação da fibra. Na Figura 2.4, mostra-se uma atenuação típica em função do comprimento de onda e observam-se regiões onde a perda é mínima, com maior destaque para a janela em torno de 1550nm, [2] [11] [12]. A conseqüência é que essa região do espectro tornou-se apropriada para enlaces de comunicações de longa distância. Observam-se, também, as regiões onde a atenuação por absorção em impurezas, principalmente relacionadas ao íon hidroxila, aumenta a perda total, destacando-se os comprimentos de onda próximos de 1400nm e de 1230nm, [2] [11]. Acrescenta-se, ainda, o efeito importante do espalhamento de Rayleigh sobre a atenuação total, [12].

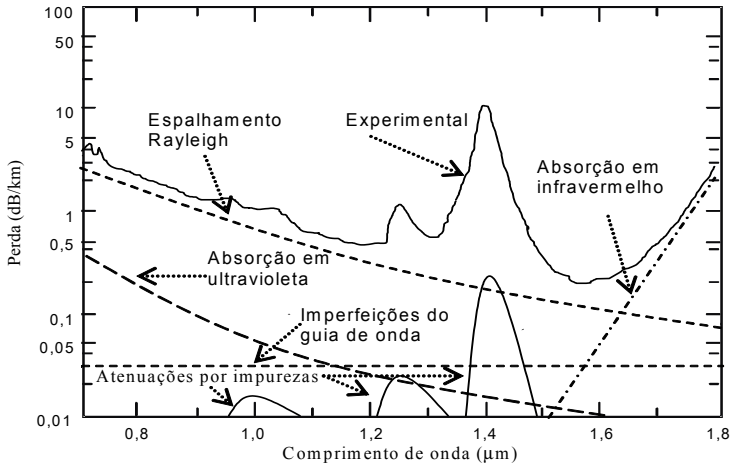


Figura 2.4 - *Curva de atenuação da fibra em função do comprimento de onda. Identificam-se valores para os quais se têm pontos de mínima atenuação na fibra óptica.*

O espalhamento de Rayleigh é um mecanismo que surge das flutuações aleatórias de densidade do material do núcleo durante a fabricação da fibra. Essas flutuações alteram a propagação fazendo uma distribuição espacial indesejável do feixe óptico de maneira aproximadamente isotrópica. A perda resultante varia inversamen-

te com a quarta potência do comprimento de onda e, portanto, predomina nos comprimentos de onda menores. Parte da luz é espalhada na direção contrária à original de propagação e confinada na fibra, retornando à origem como um *retroespalhamento*. O reflectômetro óptico no domínio do tempo (OTDR), principal instrumento para verificar perdas em fibras ópticas, em emendas e conexões é dimensionado para medir essa luz retroespalhada, [12] [13] [14] [15].

2.7 Interpretação do feixe guiado segundo a óptica geométrica

A onda eletromagnética que se propaga pela fibra sofrerá sucessivas reflexões na interface do núcleo com a casca, uma vez que há materiais diferentes em sua composição. As reflexões e refrações na interface dos dois meios obedecem as leis da teoria eletromagnética e as respectivas condições de contorno. A primeira lei da reflexão estabelece que os vetores de propagação que descrevem as direções dos campos incidente, refletido e refratado são coplanares. A segunda lei impõe que os ângulos de reflexão e de incidência são iguais, medidos em relação à normal à superfície de separação entre os meios. A lei da refração, também conhecida como lei de Snell, descreve a direção de propagação da onda refratada no segundo meio. Se os meios forem caracterizados por índices de refração N_1 e N_2 e os ângulos de incidência e refração forem ϕ_1 e ϕ_2, esta lei relaciona-os por:

$$N_1 \, sen\phi_1 = N_2 \, sen\phi_2 \tag{2.13}$$

onde os índices 1 identificam o meio de onde a onda está vindo e 2 representa o material no qual existe a refração e transmissão de parte da energia do campo incidente.

Quando o índice de refração do primeiro meio for superior ao do segundo, o ângulo de refração torna-se maior, com a propagação no segundo meio tendendo para a interface. Existirá um valor de incidência com o qual o ângulo de refração torna-se igual a 90^o e deixa de haver transmissão de energia para o segundo meio. Para qualquer ângulo de incidência igual ou superior a este valor, o campo é totalmente refletido. Suas amplitudes no segundo meio tendem a decrescer exponencialmente com a distância normal. O valor mínimo para o qual se tem a reflexão total é definido como ângulo crítico. Da equação anterior, impondo-se $\phi_2 = 90^o$ e $\phi_1 = \phi_c$, encontra-se:

$$sen\phi_c = \frac{N_2}{N_1} \tag{2.14}$$

Na estrutura da Figura 2.1, deseja-se confinar o feixe óptico no núcleo da fibra e exige-se que seu índice de refração N_n seja maior do que o da casca N_c, de maneira que em sua superfície de separação seja possível estabelecer um ângulo crítico. Assim, a luz fica confinada principalmente no núcleo pelo processo de *reflexão interna total* (Figura 2.5), [6]. Como ressaltado, isto ocorre quando o ângulo de incidência (ϕ_i) for igual ou maior do que o ângulo crítico (ϕ_c), [5] [21].

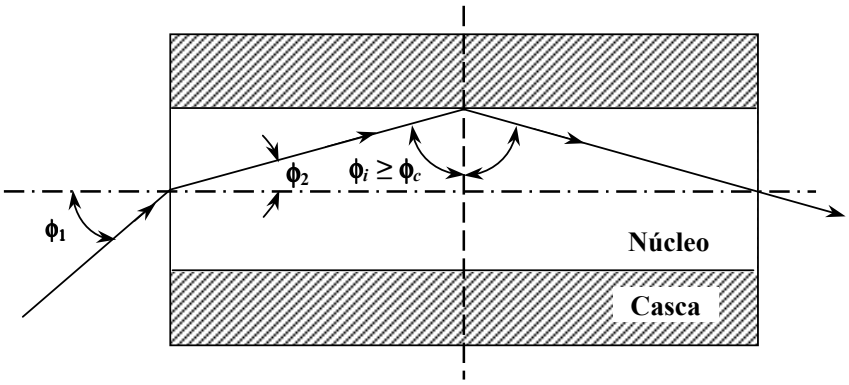


Figura 2.5 – *Relação entre o ângulo de aceitação ϕ_1, medido na face de entrada da fibra óptica e o ângulo de incidência na interface do núcleo com a casca.*

Tomando por referência a Figura 2.5 e admitindo o índice de refração do ar próximo da unidade, a lei de Snell na face de entrada da fibra fica:

$$N_{ar} sen\phi_1 = sen\phi_1 = N_n sen\phi_2 \tag{2.15}$$

O ângulo ϕ_2 é complementar do ângulo de incidência na fronteira do núcleo com a casca, ou seja, $cos\,\phi_2 = sen\phi_i$. Para ocorrer reflexão total é necessário ter-se $sen\,\phi_i \geq sen\,\phi_c$ ou $cos\,\phi_2 \geq sen\phi_c$, sendo, neste caso, $sen\phi_c = N_c / N_n$. Logo,

$$sen\phi_2 = \sqrt{1 - \left(\frac{N_c}{N_n}\right)^2} \tag{2.16}$$

Substituindo (2.16) em (2.15), tem-se o seno do ângulo máximo de captação, que representa a *abertura numérica* (*AN*) da fibra óptica:

$$sen\phi_{1máx} = N_n\left(\sqrt{1-\left(\frac{N_c}{N_n}\right)^2}\right) = \sqrt{N_n^2 - N_c^2} = AN \qquad (2.17)$$

Trata-se de um parâmetro importante, pois, entre outras propriedades, determina a eficiência do acoplamento entre a fonte de luz e a fibra óptica, [6].

2.8 Modos guiados na fibra óptica

A análise semiquantitativa anterior permite identificar diversos trajetos para o feixe óptico no interior do núcleo. Os campos superpostos relativos às ondas incidente e refletida definem distribuições transversais próprias, denominadas *modos de propagação*. Em coordenadas cilíndricas para a análise da onda na fibra, segundo a coordenada longitudinal *z*, encontram-se essas distribuições segundo a distância radial *r* e dependente do ângulo de azimute ϕ (Figura 2.2). Para cada uma, obtém-se uma constante de propagação que afetará a respectiva variação de fase por unidade de deslocamento:

$$k_1 = N_n k = \sqrt{\beta_r^2 + \beta_\phi^2 + \beta^2} \qquad (2.18)$$

onde β é o fator de fase da onda guiada e $k = 2\pi/\lambda_o$, já identificado, é a constante de propagação da luz no vácuo. O valor λ_o é o comprimento de onda da portadora óptica sem modulação. O valor de k_1 é obtido da solução da equação de onda (2.1) associada com as condições de contorno entre o núcleo e a casca, garantindo-se continuidade das componentes tangenciais dos campos elétrico e magnético.

A função ψ pode representar uma distribuição que evolua da componente longitudinal do campo elétrico, resultando em *modos TM*, ou da componente longitudinal do campo magnético, que leva aos *modos TE*, ou ainda constituindo *modos híbridos*, de tipos HE ou EH, quando incluirem ambas contribuições longitudinais, [16]. As soluções de (2.1) envolvem funções de Bessel e de Hankel, adaptadas para os modos de propagação. Identifica-se um comprimento de onda de corte e a correspondente freqüência de corte para cada um. Aquele que apresentar comprimento de onda superior ao valor de corte não pode propagar-se. Apenas o modo hibrido HE_{11}

não possui freqüência de corte, significando que, ao menos teoricamente, pode ser transmitido qualquer que seja sua freqüência. É denominado *modo fundamental* ou *modo dominante*, de relevância para as *fibras monomodo*.

A quantidade de modos guiados depende do diâmetro do núcleo em comparação com o comprimento de onda e dos índices de refração do núcleo e da casca. Utilizam-se estes valores no cálculo do número V da fibra, conhecido como *diâmetro normalizado*, [16] [17]. Seu valor depende da geometria da fibra, da variação do índice de refração do núcleo e do comprimento de onda da luz aplicada. Para o modelo com índice em degrau tendo núcleo com raio a é obtido por

$$V = k\,a\sqrt{N_n^2 - N_c^2} = \frac{2\pi\,a}{\lambda_0}\sqrt{N_n^2 - N_c^2} \tag{2.19}$$

Outro valor importante é a *constante de propagação normalizada b*, uma relação entre o fator de propagação e o número V. Entre outros fatos, seu valor definirá o comprimento de onda de corte de cada modo guiado. Partindo de (2.18), vem:

$$(N_n k)^2 - \beta^2 = \beta_r^2 + \beta_\phi^2 = \beta_t^2 \tag{2.20}$$

Verifica-se na Figura 2.2 que β_t^2 corresponde à componente transversal do fator de fase ao quadrado. Costuma-se definir o parâmetro auxiliar

$$u^2 = a^2\left(N_n^2 k^2 - \beta^2\right) = a^2 k^2\left(N_n^2 - (\beta/k)^2\right) \tag{2.21}$$

Comparando seu valor com V^2:

$$\frac{u^2}{V^2} = \frac{a^2k^2\left(N_n^2 - (\beta/k)^2\right)}{a^2k^2\left(N_n^2 - N_c{}^2\right)} = \frac{N_n^2 - (\beta/k)^2}{N_n^2 - N_c{}^2} \tag{2.22}$$

A constante de propagação normalizada b será identificada como, [11]:

$$b = 1 - \frac{u^2}{V^2} = 1 - \frac{N_n^2 - (\beta/k)^2}{N_n^2 - N_c{}^2} = \frac{(\beta/k)^2 - N_c{}^2}{N_n^2 - N_c{}^2} \tag{2.23}$$

que relaciona o fator de fase com os índices de refração de núcleo e casca. O termo (β/k) tem comportamento de um índice de refração equivalente para a onda guiada. Quando seu valor for igual a N_c, deixa de haver as condições de confinamento do feixe óptico no núcleo, ocorrendo a irradiação do modo correspondente para a casca. Indica a condição de corte para o modo resultante da solução de (2.1). Portanto, a-

contece o corte quando $b = 0$ e descreve sua relação com o número V para as diferentes distribuições do campo. Este relacionamento está ilustrado na Figura 2.6.

A maior parte das fibras utilizadas em comunicações ópticas possui pequena diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca. Usualmente, esta diferença é inferior a 3%. Assim, embora haja condições de confinamento do feixe óptico no núcleo, segundo as distribuições de campo descritas, com deslocamento na direção longitudinal, existem componentes de campo com razoáveis amplitudes na região da casca, com decaimento na direção radial. Como conseqüência, as diferenças entre as distribuições de campo dos modos híbridos é muito pequena, indicando que diversas características dos modos HE e EH são muito próximas. Resultam em superposições das soluções exatas da equação de onda em modos linearmente polarizados, denominados *modos fracamente guiados*. Identificam-se como *modos LP* e na Tabela 2.1 têm-se as suas correspondências com as distribuições exatas dos quais são formados, descritos pelas funções de Bessel e de Hankel, [6] [18].

Tabela 2.1 - *Correspondência entre os modos linearmente polarizados e os modos exatos dos quais eles são formados.*

Modos linearmente polarizados	**Modos exatos**
LP_{01}	HE_{11}
LP_{11}	HE_{21} , TE_{01} , TM_{01}
LP_{21}	HE_{31} , EH_{11}
LP_{02}	HE_{12}
LP_{31}	HE_{41} , EH_{21}
LP_{12}	HE_{22} , TE_{02} , TM_{02}
LP_{LP}	HE_{2p} , TE_{0p} , TM_{0p}
LP_{lp} ($l \neq 0$ ou 1)	$HE_{l+1,p}$, $EH_{l-1,p}$

Quando o número V, referido ao centro do núcleo, for muito maior que 2,405, valor correspondente à primeira raiz da função de Bessel de primeira espécie de ordem zero, a quantidade de modos confinados é:

$$N_m \cong \frac{gV^2}{2(g+2)} \tag{2.24}$$

onde g é um parâmetro associado à variação radial do índice de refração do núcleo. Se os índices de núcleo e casca forem constantes, caso da fibra com índice em degrau, tem-se $g \to \infty$ e, portanto:

$$N_m \cong \frac{1}{2} V^2 \tag{2.25}$$

Neste caso, muitos modos propagam-se pelo núcleo e tem-se a *fibra multimodo*. Quando $V \leq 2{,}405$, apenas o modo híbrido HE_{11} (ou seu equivalente linearmente polarizado LP_{01}) é guiado, caracterizando a *fibra monomodo*.

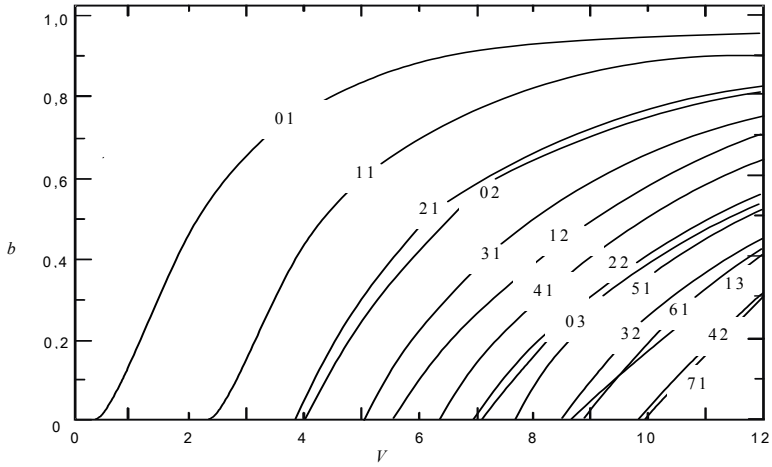


Figura 2.6 - *Relação entre a constante de propagação normalizada b como função do diâmetro normalizado V para os modos LP*, [18].

Capítulo 3

DISPERSÕES NA FIBRA ÓPTICA

3.1 Conceituação do fenômeno da dispersão

A energia eletromagnética na fibra distribui-se entre as componentes espectrais do feixe óptico e entre os modos propagantes. O sinal sofrerá *dispersão* devido ao fato de o tempo de transmissão variar de acordo com as condições encontradas em seu trajeto. A conseqüência para um feixe óptico modulado digitalmente é um alargamento temporal em relação à duração do sinal aplicado. Isso poderá provocar uma sobreposição de pulsos adjacentes, conhecida como interferência entre símbolos ou intersimbólica, acarretando aumento na taxa de erro de bit (BER) do sistema. Na Figura 3.1, ilustra-se o fenômeno, com destaque para a possibilidade de erros na recepção, [2].

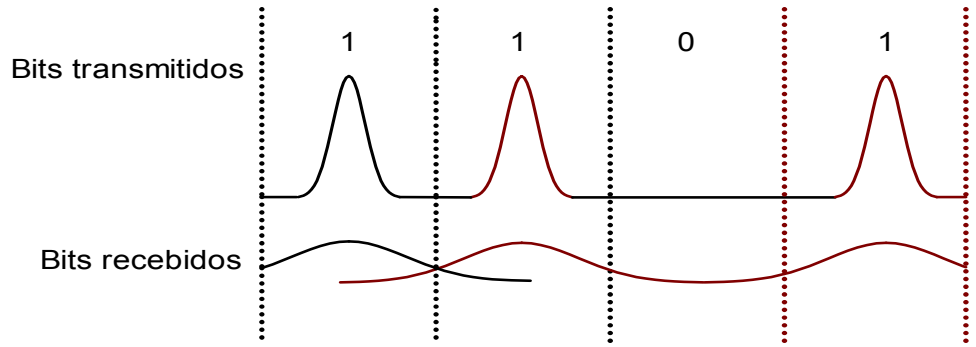


Figura 3.1 - *Seqüência temporal de bits transmitidos e recebidos com efeito da dispersão, podendo ocorrer interferência entre símbolos.*

Para uma breve descrição do processo de dispersão, parte-se dos conceitos de velocidade de fase e de grupo já discutidos. Usando $\beta = \omega / v_p$, encontra-se uma relação geral entre as duas velocidades:

$$v_g = \frac{v_p}{1 - \left(\frac{\omega}{v_p}\right)\left(\frac{\partial v_p}{\partial \omega}\right)} \tag{3.1}$$

que será usada para uma descrição qualitativa da dispersão. O meio será sem dispersão quando a velocidade de grupo for independente da freqüência (ou do comprimento de onda). Em condições comuns, é possível que a derivada de v_p em relação a ω seja positiva, negativa, ou nula. No primeiro caso, tem-se a chamada dispersão anômala, no segundo caso a dispersão normal e na terceira condição resulta no meio sem dispersão. Para o tratamento da fibra óptica, é mais conveniente analisar a relação entre as velocidades em relação ao comprimento de onda. Para isto, deve-se proceder da maneira descrita a seguir, partindo da derivada da freqüência angular em relação ao fator de fase e aplicando a regra da derivação em cadeia:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial \beta} = \frac{\partial \omega}{\partial \lambda}\frac{\partial \lambda}{\partial \beta} \tag{3.2}$$

Colocando-se $\omega = 2\pi f = 2\pi v_p / \lambda$ e $\lambda = 2\pi/\beta$, a expressão anterior fica

$$v_g = \frac{\partial}{\partial \lambda}\left(\frac{2\pi v_p}{\lambda}\right)\frac{\partial}{\partial \beta}\left(\frac{2\pi}{\beta}\right) \tag{3.3}$$

Portanto, efetuando as derivações, conclui-se por uma nova expressão relacionando as velocidades de fase e de grupo:

$$v_g = (2\pi)^2 \left\{\frac{1}{\lambda^2}\left(\lambda \frac{\partial v_p}{\partial \lambda} - v_p \frac{\partial \lambda}{\partial \lambda}\right)\right\}\left(-\frac{1}{\beta^2}\right) = v_p - \lambda \frac{\partial v_p}{\partial \lambda} \tag{3.4}$$

Como a velocidade de grupo está associada ao deslocamento do sinal, é importante conhecer o seu comportamento em relação às correspondentes componentes. Logo, deve-se obter sua derivada em relação à freqüência ou ao comprimento de onda. Assim, tem-se:

$$\frac{\partial v_g}{\partial \lambda} = \frac{\partial}{\partial \lambda}\left(v_p - \lambda \frac{\partial v_p}{\partial \lambda} \right) = -\lambda \frac{\partial}{\partial \lambda}\left(\frac{\partial v_p}{\partial \lambda} \right) = -\lambda \frac{\partial^2 v_p}{\partial \lambda^2} \tag{3.5}$$

Então, de (3.1) percebe-se que, para não ocorrer dispersão, a primeira possibilidade é a velocidade de fase ser igual à velocidade de grupo. Sabe-se que em um meio qualquer $v = c/N$ e $v_g = c/N_g$, onde c é a velocidade da luz no vácuo, N é o índice de refração do material e N_g o índice de refração de grupo. Entre estes parâmetros existe uma relação definida a partir destas velocidades. Para determiná-la, inicia-se com o valor do comprimento de onda no meio infinito, dado por:

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{N} = \frac{c/f}{N} = \frac{2\pi}{\beta} \tag{3.6}$$

Em seguida, encontram-se o fator de fase $\beta = 2\pi N/\lambda$ e sua derivada em relação à freqüência angular:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda}\left[\frac{dN}{d\lambda} - \frac{N}{\lambda} \right] \tag{3.7}$$

Sendo $\omega = 2\pi f = 2\pi c/\lambda$, sua derivada em relação a λ conduz a $d\omega = -2\pi c\lambda^{-2} d\lambda$. Combinando com a equação anterior, vem:

$$\frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{c}\left[N - \lambda \frac{dN}{d\lambda} \right] = \frac{1}{v_g} \tag{3.8}$$

de onde sai o índice de refração de grupo, [6]:

$$N_g = \frac{c}{v_g} = N - \lambda \frac{dN}{d\lambda} \tag{3.9}$$

notadamente diferente do índice de refração próprio do material, se seu valor for dependente do comprimento de onda, situação geral para os meios. Neste caso, não pode haver condição da velocidade de fase ser igual à de grupo.

De acordo com (3.5), a outra possibilidade de não haver dispersão seria ter-se a primeira derivada de v_p igual a uma constante, implicando a necessidade desta grandeza variar linearmente com o comprimento de onda. De acordo com (3.9), a velocidade de grupo constante com o comprimento de onda indica que N_g deva ser

constante e, conseqüentemente, a derivada de N em relação a λ também deve ser constante. Ou seja, é necessário que se tenha N dependente linearmente do comprimento de onda. Para a sílica, um material de grande relevância na fibra óptica, como já mencionado, isto ocorre próximo de 1270nm. Nos meios dispersivos anômalos, para comprimentos de onda maiores, o índice de refração decresce mais rapidamente e a derivada da velocidade de fase em (3.4) fará a velocidade de grupo diminuir com o aumento do comprimento de onda. Para os dispersivos normais, o índice de refração decresce mais lentamente com o comprimento de onda e a velocidade de grupo aumentará com o comprimento de onda. Para a sílica, esta condição ocorre para comprimentos de onda inferiores a 1270nm.

3.2 Tipos relevantes de dispersão na fibra óptica

a. Dispersão modal. Mostrou-se a possibilidade de haver percursos diferentes na fibra óptica, dependendo do diâmetro do núcleo em relação ao comprimento de onda da luz e da abertura numérica. As trajetórias e as respectivas distribuições de campo determinam os modos de propagação, em quantidade tanto maior quanto maiores forem esses parâmetros. Cada modo terá velocidade de fase e velocidade de grupo próprias, correspondendo a atrasos diferentes entre eles, tendo como conseqüência a dispersão. Para fibra multimodo, a diferença de tempo, em cada comprimento de onda, está associada à correspondente velocidade de grupo. Essa dispersão deve ser sempre avaliada para sistemas que utilizem esta fibra. Neste trabalho, como o foco é a análise de desempenho de fibra monomodo, não será considerada a dispersão originada por múltiplos percursos.

b. Dispersão cromática. Dispersão cromática relaciona-se a diferentes velocidades de propagação das componentes espectrais do pulso óptico no meio de transmissão. O fenômeno é causado por duas razões. A primeira é a *dispersão do material* e ocorre porque o índice de refração é dependente da freqüência, nos moldes já discutidos. Logo, componentes com freqüências diferentes viajam com diferentes velocidades. A segunda é a *dispersão de guia de onda* e ocorre porque o fator de fase depende também do comprimento de onda transmitido. Por isso, a velocidade estará associada a

cada comprimento de onda da composição espectral do feixe óptico. Esta dispersão pode existir mesmo em fibras monomodo.

Na sílica, a dispersão do material é quantificada a partir do índice de refração N descrito pela fórmula de Sellmeier, [2] [11]:

$$N^2 - 1 = \sum_i^m \frac{A_i \lambda_i^{\,2}}{\lambda^{\,2} - \lambda_{0i}^{\,2}} \tag{3.10}$$

onde os parâmetros A_i e λ_{0i} têm seus valores determinados experimentalmente. Estão apresentados na Tabela 3.1 para $m = 3$, onde os comprimentos de onda e os coeficientes são para valores em micrometros. Com estes valores levantou-se a curva apresentada na Figura 3.2.

Tabela 3.1 - *Valores dos coeficientes da formula de Sellmeier para a sílica pura*, [11].

A_1	A_2	A_3	λ_{01}	λ_{02}	λ_{03}
0,6961663	0,4079426	0,8974794	0,0684043	0,1162414	9,896161

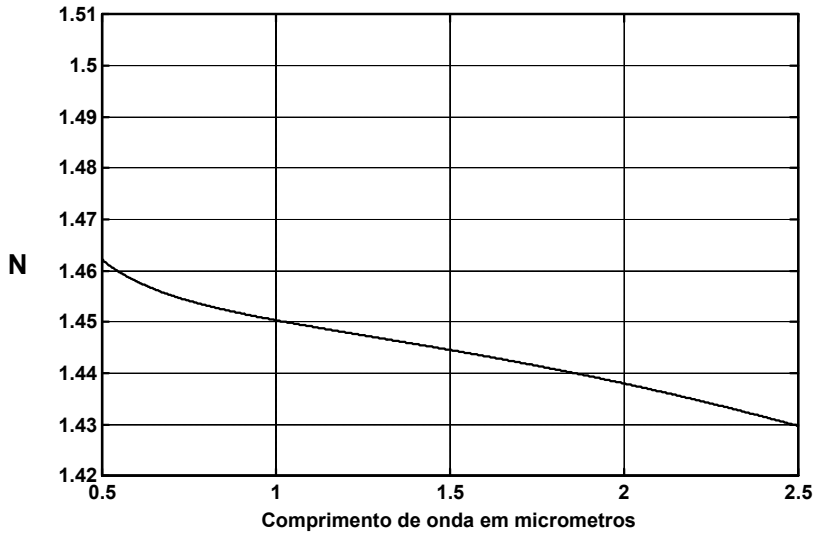


Figura 3.2 - *Efeito do comprimento de onda sobre o valor do índice de refração para a sílica pura calculado de acordo com a fórmula de Sellmeier.*

Considerando o índice de refração de grupo dado em (3.9), a variação do índice de refração com o comprimento de onda passa a ser importante para definir o comportamento do campo eletromagnético no meio. Como verificado na Figura 3.2, o índice de refração da sílica diminui com o aumento de λ e sua derivada assume um

valor negativo. Portanto, o índice de refração de grupo é maior do que o do material. Derivando (3.10) em relação ao comprimento de onda, resulta:

$$\frac{dN}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{N}\left[\frac{A_1\lambda_1^2}{\left(\lambda^2-\lambda_{01}{}^2\right)^2}+\frac{A_2\lambda_2^2}{\left(\lambda^2-\lambda_{02}{}^2\right)^2}+\frac{A_3\lambda_3^2}{\left(\lambda^2-\lambda_{03}{}^2\right)^2}\right] \tag{3.11}$$

que substituída em (3.9) descreve o comportamento de N_g:

$$N_g = N+\frac{\lambda^2}{N}\left[\frac{A_1\lambda_1^2}{\left(\lambda^2-\lambda_{01}{}^2\right)^2}+\frac{A_2\lambda_2^2}{\left(\lambda^2-\lambda_{02}{}^2\right)^2}+\frac{A_3\lambda_3^2}{\left(\lambda^2-\lambda_{03}{}^2\right)^2}\right] \tag{3.12}$$

Aplicando os valores da Tabela 3.1, traçam-se as curvas da Figura 3.3, relativas aos comportamentos de N e N_g. Observa-se que para o comprimento de onda de 1270nm, N_g passa pelo mínimo e sua taxa de variação com o comprimento de onda é zero. Em torno deste valor, a variação com λ é pequena, indicando que as componentes do sinal deslocam-se quase com a mesma velocidade e garantindo mínima dispersão. Como o índice de refração de grupo varia suavemente, a derivada de λ nesta região tem pequeno valor.

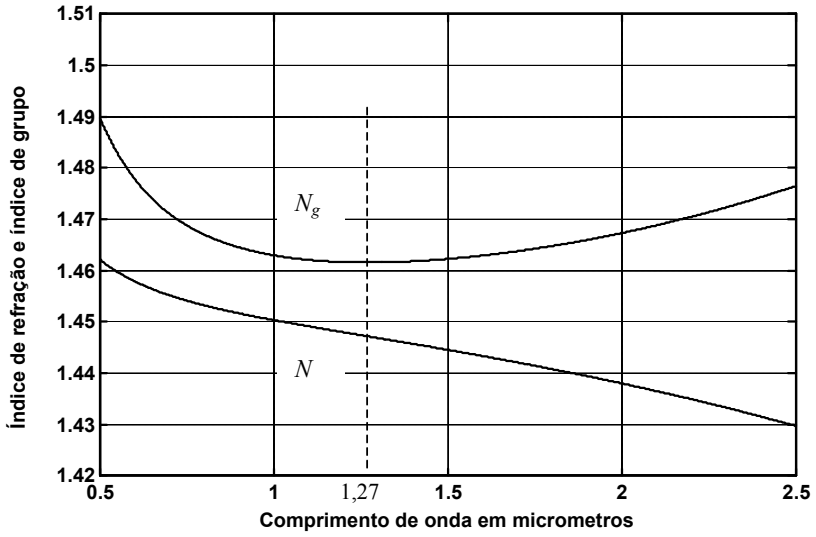


Figura 3.3 - *Comparação entre os comportamentos do índice de refração do material e o índice de refração de grupo para a sílica pura.*

Deve-se verificar, também, como a largura espectral da fonte óptica influi sobre a dispersão do pulso de luz. O aumento temporal é determinado por:

$$\Delta t = \frac{dt}{d\lambda}\Delta\lambda \tag{3.13}$$

onde a derivada apresenta a variação do tempo de propagação em relação ao comprimento de onda. Considerando que o tempo necessário para a propagação do sinal pode ser obtido dividindo-se a distância *L* pela velocidade de grupo, tem-se:

$$t = \frac{L}{v_g} = \frac{L}{c}\left[N - \lambda\left(\frac{dN}{d\lambda}\right)\right] \tag{3.14}$$

e sua derivada é:

$$\frac{dt}{d\lambda} = -\frac{L}{c}\lambda\left(\frac{d^2N}{d\lambda^2}\right) \tag{3.15}$$

Substituindo (3.15) em (3.13), chega-se a:

$$\Delta t = -\frac{L}{c}\lambda\left(\frac{d^2N}{d\lambda^2}\right)\Delta\lambda \tag{3.16}$$

Desta relação, tira-se o parâmetro que caracteriza a maior ou menor dispersão do material, definido como:

$$\sigma_m = \frac{\Delta t}{L\Delta\lambda} = -\frac{\lambda}{c}\left(\frac{d^2N}{d\lambda^2}\right) \tag{3.17}$$

medido em nanossegundos por quilometro por unidade de largura espectral da fonte de luz (ns/nm.km). Verifica-se que a dispersão do material é nula quando $d^2N/d\lambda^2 = 0$. Portanto, como já mencionado, a derivada primeira de *N* em relação a λ deve resultar em uma constante e *N* variar linearmente com λ.

Para analisar a dispersão de guia de ondas, usa-se o modelo de fibra óptica da Figura 3.4, com indicação da região de confinamento da luz, coincidente com a estrutura básica da fibra óptica, [12]. Tomando a trajetória *PQRS*, observam-se sucessivas reflexões na onda eletromagnética. A condição $N_c < N_n$, onde N_c é o índice de refração da casca e N_n é o índice de refração do núcleo, proporciona a condição de transmissão pelo núcleo, para incidência com ângulo igual ou maior do que o ângulo

crítico e condições de interferência construtiva no núcleo, [12]. Esta propagação está relacionada com o ângulo de incidência, tendo uma parcela da luz refletida na interface casca/núcleo e a outra que forma o campo óptico refratado para a casca. Para os modos guiados, o campo decresce de amplitude na direção radial e acompanha o sinal no núcleo para satisfazer as condições de contorno em todos os pontos ao longo da interface núcleo-casca. Em fibras monomodo, aproximadamente 20% da luz propaga-se pela casca, [12].

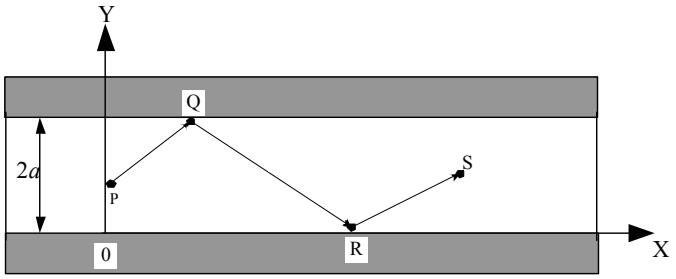


Figura 3.4 - *Corte longitudinal de um guia de onda, destacando o percurso de um modo guiado.*

A relação entre os índices faz com que a velocidade da parcela refratada para a casca seja maior do que a que caminha pelo núcleo, levando a diferentes tempos de propagação e a uma dispersão. Esta é a essência da dispersão de guia de onda. Para a fibra monomodo padrão G652, a dispersão de guia de onda em torno de 1550nm tem sinal contrário à dispersão do material, proporcionando pequena compensação nos dois efeitos. Na Figura 3.5 tem-se a curva da dispersão cromática total para essa fibra padrão com suas componentes de dispersão de guia de ondas e do material, [5].

Se houver uma parcela maior de luz viajando pela casca, aumentará a dispersão do guia de onda e a dispersão cromática total será alterada. Ainda na Figura 3.5, ocorre um ponto de dispersão nula próximo de 1300nm. Verifica-se também que o ponto de dispersão nula será em comprimentos de onda maiores, se a dispersão do guia de onda for maior. A Figura 3.6 apresenta o gráfico de uma fibra de dispersão deslocada não-nula em 1550nm. Neste caso, ajustou-se o ponto de dispersão nula para 1620nm, [12].

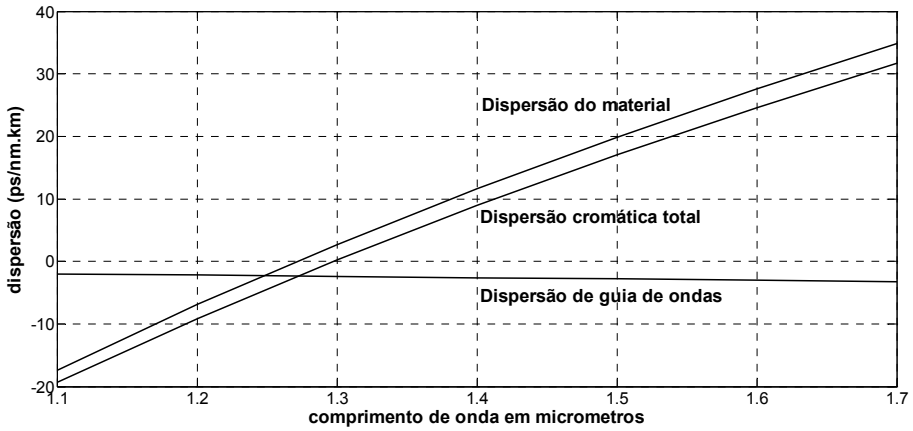


Figura 3.5 - *Curva da dispersão cromática total para uma fibra monomodo padrão em função do comprimento de onda, além das curvas da dispersão de guia de ondas e da dispersão do material.*

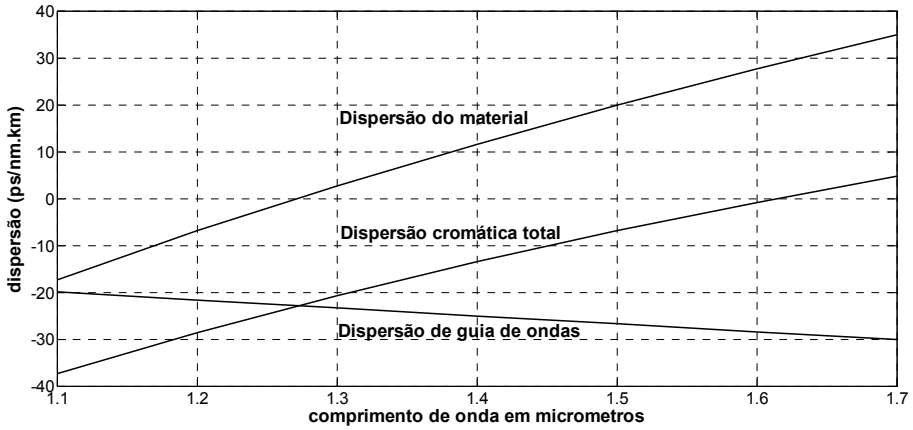


Figura 3.6 - *Curva da dispersão cromática total para uma fibra de dispersão deslocada não-nula em função do comprimento de onda, além das curvas da dispersão do guia de ondas e da dispersão do material*, [12].

Foi desenvolvida a fibra de dispersão deslocada (DS) que possui o ponto de dispersão nula próximo de 1550nm, comprimento de onda com menor atenuação para a fibra monomodo a base de sílica. Entretanto, a dispersão nula aumenta a interação entre os canais de um sistema de multiplexação em comprimento de onda (WDM), provocando penalidades no sistema por efeitos não-lineares, principalmente o conhecido como *mistura de quatro ondas*, [5]. As fibras com dispersão deslocada não-nula têm o objetivo de manter uma relação de compromisso entre a dispersão cromática e os efeitos não-lineares, [5]. Para isto ocorrer, mantêm-se uma dispersão reduzida na região de 1550nm, mas não nula. Escolhem-se valores entre 1ps/nm.km e 6ps/nm.km, menores do que o apresentado pela fibra monomodo padrão, que é de

aproximadamente 17ps/nm.km. Este artifício garante que não haja aumento significativo dos efeitos não-lineares. Desta forma, o ponto de dispersão nula será deslocado para comprimentos de ondas maiores ou menores do que 1550nm.

As curvas de dispersão apresentadas foram levantadas a partir de dados experimentais e traçadas a partir de fórmulas empíricas que satisfizessem os valores conhecidos. (Figuras 3.5 e 3.6). As equações para dispersão do material (D_M), dispersão de guia de onda para a fibra monomodo padrão ($D_{G\text{-}SM}$), dispersão de guia de onda para a fibra de dispersão deslocada não-nula ($D_{G\text{-}NZD}$) e dispersão total (D_T) foram:

$$\begin{aligned} D_M &= 120\log\lambda - 28{,}8 \\ D_{G-SM} &= -2\lambda + 0{,}2 \\ D_{G-NZD} &= -17\lambda - 1{,}25 \\ D_T &= D_M + D_G \end{aligned} \tag{3.18}$$

c. Dispersão por modo de polarização. Além dos efeitos das dispersões anteriores apresentadas, outra influência importante no desempenho de sistemas com fibras ópticas refere-se à dispersão por modo de polarização (PMD). Este novo efeito também contribui de forma significativa para a limitação na capacidade do sistema instalado. As análises de suas influências são mais detalhadas no próximo capítulo, por ser um dos focos deste trabalho. Incluem-se simulações e interpretações de resultados para sistemas reais.

3.3 Compensação de Dispersão Cromática

É possível compensar a dispersão cromática de diversas maneiras. As duas mais conhecidas são as que empregam fibra de dispersão oposta e a com grade de Bragg. Como visto em (2.11), a velocidade de grupo é:

$$v_g = \frac{c}{N_g} \tag{3.19}$$

e verifica-se na Figura 3.3 que na região de 1550nm a velocidade de propagação de comprimentos de onda menores é superior à de comprimentos de onda maiores.

Considera-se que a transmissão em uma fibra padrão apresenta uma dispersão cromática da ordem de 17 ps/nm·km, quando opera em torno de 1550nm, conforme a Rec. G.652 da ITU, [3]. A transmissão neste comprimento de onda é de interesse devido ao emprego dos amplificadores ópticos a fibra dopada com érbio (*EDFA)*. Dopando-se a sílica ou alterando-se o diâmetro do núcleo ou o índice de refração do núcleo e da casca, é possível obter fibras que apresentem dispersão cromática normal na região de 1550nm. Colocando-se esta fibra em cascata com a fibra padrão haverá compensação da dispersão, pois os comprimentos de onda transmitidos com velocidade maior na fibra padrão viajarão com velocidade menor na fibra de compensação.

Para anular a dispersão total do sistema, o comprimento da fibra de compensação deverá satisfazer a condição:

$$D_T = L_{ST} \cdot D_{ST} + L_{DCF} \cdot D_{DCF} = 0 \tag{3.20}$$

onde L_{ST} é o comprimento da fibra de transmissão, D_{ST} é o coeficiente de dispersão da fibra original, L_{DCF} é o comprimento da fibra de compensação, D_{DCF} é o coeficiente de dispersão da fibra de compensação e D_T é a dispersão total do sistema. Costuma-se especificar os comprimentos em quilômetros e os coeficientes de dispersão em ps/nm.km. Quando o resultado não for nulo, D_T fica dada em ps/nm. Esta é uma fórmula teórica que resulta em uma dispersão mínima. A razão é que a fibra não tem suas características de dispersão cromática uniformemente distribuídas em toda a sua extensão e o método compensa apenas a dispersão cromática, não alterando outros fatores de dispersão. Outra consideração importante é que como a fibra de compensação é colocada em cascata com o sistema, a atenuação total será ampliada.

A segunda opção para compensar a dispersão cromática é o emprego de *grades de Bragg*. O termo *grade* descreve qualquer dispositivo cuja operação provoque interferência em um sinal óptico transmitido com múltiplos comprimentos de onda, tendo como conseqüência deslocamentos de fase diferentes. Qualquer perturbação periódica na propagação do sinal atua como uma grade de Bragg e pode ser obtida com uma variação periódica no índice de refração do meio, [5]. A grade de Bragg é um filtro óptico reflexivo com altíssima seletividade espectral, que reflete de forma eficiente o comprimento de onda de Bragg, λ_B, que é dado por, [19]:

$$\lambda_B = 2N\Lambda \tag{3.21}$$

onde N é o índice de refração da fibra e Λ é o período da grade de Bragg, que representa o espaçamento entre as variações periódicas de índice de refração, como observado na Figura 3.7. Identifica-se um trecho de fibra com alterações periódicas formando a grade, ajustada para reflexão máxima em um comprimento de onda especificado e reflexões menores em torno deste valor. O feixe óptico indicado possui estes comprimentos de onda integrando sua representação espectral. Na transmissão, as componentes refletidas têm redução de amplitude, modificando a distribuição de potência em função de λ na composição do sinal de saída. Nota-se que a eficiência da reflexão decresce conforme o comprimento de onda afasta-se do comprimento de onda de Bragg. Seu valor pode ser ajustado alterando Λ ou N e pode apresentar exatidão da ordem de 1pm, [19].

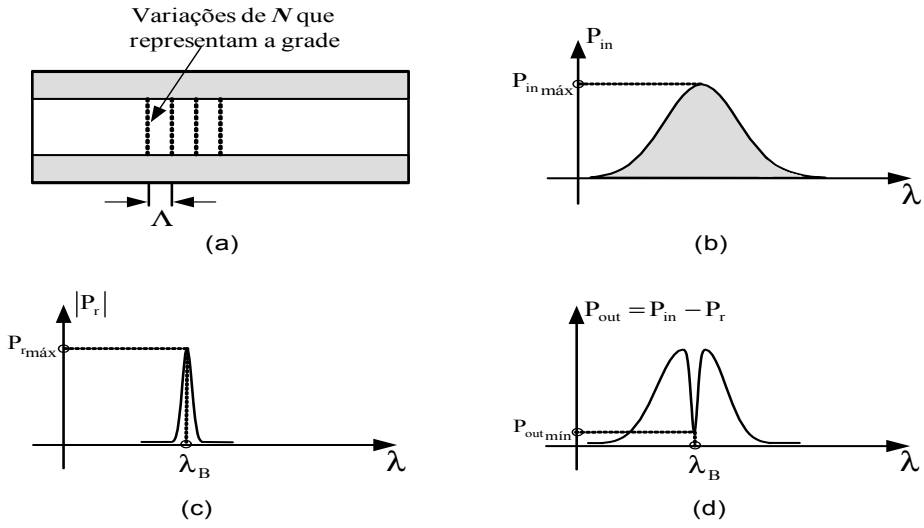


Figura 3.7 – (a) *Trecho de fibra com grade de Bragg.* (b) *Distribuição espectral do feixe óptico de entrada.* (c) *Representação espectral do comportamento da grade de Bragg.* (d) *Sinal óptico de saída, no domínio da freqüência.*

Grades de Bragg em fibras ópticas podem ser usadas para diversas aplicações, como filtros, dispositivo para inserção e retirada em multiplexadores, compensação da dispersão cromática, sensores, etc., [5]. A combinação de várias delas em cascata, permite fabricar uma fibra que reflita comprimentos de onda específicos em distâncias diferentes. Como exemplo, comprimentos de onda maiores serão refletidos no

inicio e comprimentos de onda menores no final da fibra. Para este exemplo, os comprimentos de onda maiores permanecerão por um tempo menor na fibra. Esta diferença de tempo fará uma compensação da dispersão. Considerando que λ_2 é maior que λ_1, pode-se observar na Figura 3.8 que λ_1 entra no módulo de compensação antes de λ_2, caracterizando a dispersão do sistema. O circulador os encaminha para a fibra com grades de Bragg. Como λ_2 será refletido no início da fibra e λ_1 no final, λ_2 ficará menos tempo na fibra com grades de Bragg do que λ_1 e esta diferença será responsável pela compensação da dispersão. Conhecendo-se a dispersão total do sistema e a compensação provocada em cada fibra com grades de Bragg, pode-se calcular quantas fibras deverão ser projetadas para o módulo de compensação, [17].

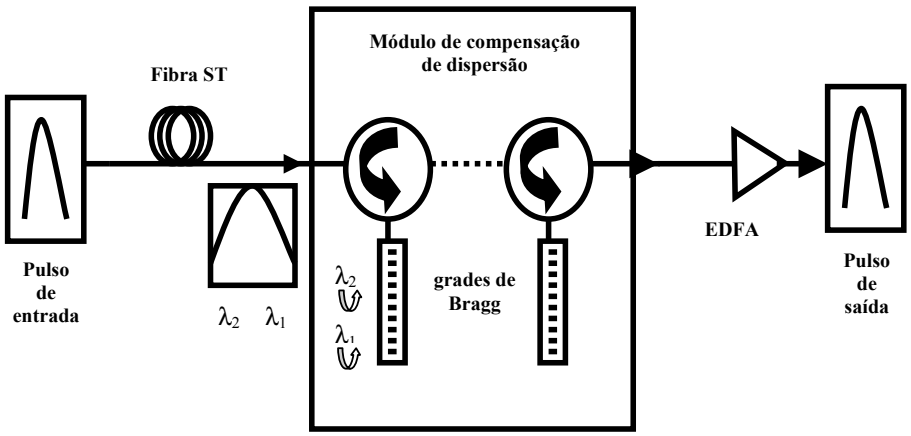


Figura 3.8 - *Modelo de utilização de grades de Bragg para compensar a dispersão cromática*, [17].

Capítulo 4

DISPERSÃO POR MODO DE POLARIZAÇÃO

4.1 Meios com dupla refração

Em um meio anisotrópico, a cada direção de propagação de uma onda eletromagnética correspondem dois estados possíveis de polarização, mutuamente perpendiculares e com velocidades diferentes, [7] [12] [16]. Qualquer que seja o estado inicial de polarização, quando uma onda eletromagnética penetra em um meio anisotrópico, o seu comportamento é descrito pela superposição de duas ondas com polarizações ortogonais. Essa propriedade dá origem ao fenômeno da *birrefringência* ou *dupla refração* e os dois modos refratados são identificados como ordinário e extraordinário. A birrefringência pode resultar de fatores intrínsecos como irregularidades geométricas ou variações do índice de refração do núcleo da fibra óptica, entre outros. Além disso, fatores extrínsecos como curvatura, torção ou compressão da fibra podem também levar a este fenômeno, [12]. Em linhas gerais, as principais causas da birrefringência são: pressão lateral assimétrica, núcleo não-circular, variações no perfil do índice de refração do núcleo, curvaturas, fibra torcida, fibra dobrada, fibra pressionada e variações na temperatura.

4.2 Propagação de ondas eletromagnéticas na matéria

Mostrou-se em (2.10) que o índice de refração é

$$N = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \tag{4.1}$$

sendo $\mu_r = 1 + \chi_m$, onde χ_m é a susceptibilidade magnética do meio, valor muito pequeno, de modo que se pode considerar $\mu_r = 1$. Em conseqüência, o índice de refração fica $N = \sqrt{\varepsilon_r}$, com comportamento de uma grandeza escalar. Em meios anisotrópicos, ε_r passa a ser um tensor de segunda ordem, dado genericamente por, [16]:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Uma de suas formas de apresentação, válida para os chamados meios girotrópicos e uniaxiais, é:

$$\tilde{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & ik & 0 \\ -ik & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_2 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

Em meios dielétricos, a lei de Ampère é $\vec{\nabla} \times \vec{H} = i\omega \vec{D}$, sendo $\vec{H}$ o campo magnético e $\vec{D}$ o deslocamento elétrico, obtido pela transformação do campo elétrico com o emprego da permissividade (4.2), da forma $\vec{D} = \tilde{\varepsilon} \cdot \vec{E}$. Em uma matriz simétrica, tem-se a simplificação:

$$D_x = \varepsilon_{xx} E_x ; \quad D_y = \varepsilon_{yy} E_y ; \quad D_z = \varepsilon_{zz} E_z \tag{4.4}$$

onde $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ e ε_{zz} são chamados de valores principais da permissividade. Admitindo os campos em coordenadas cartesianas e propagação segundo o eixo *z*, tem-se:

$$\vec{E} = \left(E_x \hat{x} + E_y \hat{y}\right) e^{-i\beta z} \tag{4.5}$$

$$\vec{H} = \left(H_x \hat{x} + H_y \hat{y}\right) e^{-i\beta z} \tag{4.6}$$

Desenvolvendo o rotacional do campo magnético, simplificando e comparando os termos membro a membro, vem:

$$\beta H_y = \omega D_x \tag{4.7}$$

$$-\beta H_x = \omega D_y \tag{4.8}$$

Usando (4.3) para obter as componentes de $\vec{D}$, obtêm-se:

$$D_x = \varepsilon_1 E_x + ikE_y \tag{4.9}$$

$$D_y = -ikE_x + \varepsilon_1 E_y \tag{4.10}$$

e combinando com as equações anteriores, resultam:

$$\beta H_y = \omega\varepsilon_1 E_x + ik\omega E_y \tag{4.11}$$

$$-\beta H_x = -ik\omega E_x + \omega\varepsilon_1 E_y \tag{4.12}$$

Da lei de Faraday, $\vec{\nabla}\times\vec{E} = -i\omega\mu\vec{H}$, após o desenvolvimento em coordenadas retangulares, encontram-se:

$$-\beta E_y = \omega\mu H_x \tag{4.13}$$

$$\beta E_x = \omega\mu H_y \tag{4.14}$$

Tirando H_x de (4.13), H_y de (4.14), substituindo em (4.12) e (4.11), obtêm-se:

$$\left(\beta^2 - \omega^2\mu\varepsilon_1\right)E_y = -ik\omega^2\mu E_x \tag{4.15}$$

$$\left(\beta^2 - \omega^2\mu\varepsilon_1\right)E_x = ik\omega^2\mu E_y \tag{4.16}$$

Destas equações devidamente combinadas, acham-se:

$$E_y = \begin{cases} +iE_x \\ -iE_x \end{cases} \tag{4.17}$$

Portanto, a solução das equações de Maxwell indica duas ondas com polarizações circulares, uma para a direita, denominada dextrorrotatória e outra para a esquerda, chamada de levorrotatória. Substituindo (4.17) em (4.15), acham-se os fatores de fase correspondentes às ondas polarizadas à direita e à esquerda:

$$\beta_d = \omega\sqrt{\mu\left(\varepsilon_1 - k\right)} \tag{4.18}$$

$$\beta_e = \omega\sqrt{\mu\left(\varepsilon_1 + k\right)} \tag{4.19}$$

Como cada solução tem fator de fase próprio, a onda dextrorrotatória tem velocidade de fase e de grupo diferentes da onda levorrotatória. Para verificar as conseqüências, será considerado que no plano $z = 0$, o campo elétrico aponte na direção

$+\hat{x}$, ou seja, $\vec{E} = E_0\hat{x}$, [20]. Em uma distância *z* qualquer tem-se a superposição dessas componentes, da forma

$$\vec{E} = \frac{E_0}{2}\left\{(\hat{x} + i\,\hat{y})e^{-i\beta_d z} + (\hat{x} - i\,\hat{y})e^{-i\beta_e z}\right\} =$$

$$= \frac{E_0}{2}\left\{(\hat{x}+i\,\hat{y})\,e^{-i(\beta_d+\beta_e)z/2}\,e^{-i(\beta_d-\beta_e)z/2} + (\hat{x}-i\,\hat{y})e^{-i(\beta_d+\beta_e)z/2}e^{i(\beta_d-\beta_e)z/2}\right\} \qquad (4.20)$$

Chamando

$$\beta_p = \frac{\beta_d + \beta_e}{2} \qquad (4.21)$$

$$\beta_n = \frac{\beta_d - \beta_e}{2} \qquad (4.22)$$

resulta:

$$\vec{E} = \frac{E_0}{2}e^{-i\beta_p z}\left\{\hat{x}\left[e^{-i\beta_n z} + e^{i\beta_n z}\right] - i\,\hat{y}\left[e^{i\beta_n z} - e^{-i\beta_n z}\right]\right\} =$$

$$= E_0\,e^{-i\beta_p z}\left\{\hat{x}\cos\beta_n z + \hat{y}\,sen\beta_n z\right\} \qquad (4.23)$$

sendo β_p o fator de fase do campo resultante. Esta equação mostra que o plano de polarização da onda no meio vai alterando-se à medida em que ocorre a propagação, fenômeno conhecido como *rotação de Faraday* ou *efeito Faraday*. Meios e substâncias que têm este comportamento são opticamente ativas e, em muitos casos, permitem o controle do fenômeno, [21].

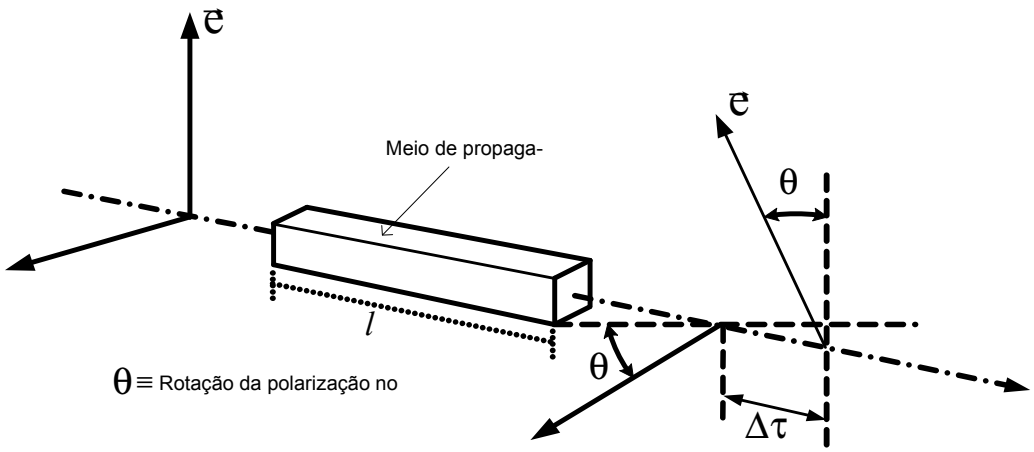


Figura 4.1 - Rotação da polarização no meio e atraso entre os modos de propagação.

Se um feixe de luz linearmente polarizado atravessa uma substancia opticamente ativa, (Figura 4.1), a onda na saída da região é também linearmente polarizada, mas em um plano que faz um ângulo Θ com o plano de polarização inicial. O valor de Θ é proporcional à extensão do trecho *l* que o feixe atravessa, com a constante de proporcionalidade dada em (4.22).

4.3 Propagação de ondas planas em cristais anisotrópicos

Considerando a expressão de uma onda plana, seus campos variam com $e^{-i\vec{\beta}\vec{r}}$ onde $\vec{\beta}$ e $\vec{r}$ são, respectivamente, os vetores associados ao fator de fase e ao vetor posição de um ponto genérico do espaço, dados por:

$$\vec{\beta} = \hat{x}\beta_x + \hat{y}\beta_y + \hat{z}\beta_z \tag{4.24}$$

$$\vec{r} = \hat{x}\,x + \hat{y}\,y + \hat{z}\,z \tag{4.25}$$

Os vetores que descrevem o campo eletromagnético no meio ficam:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-i\vec{\beta}\vec{r}} \tag{4.26}$$

$$\vec{D} = \vec{D}_0 e^{-i\vec{\beta}\vec{r}} \tag{4.27}$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 e^{-i\vec{\beta}\vec{r}} \tag{4.28}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 e^{-i\vec{\beta}\vec{r}} \tag{4.29}$$

Com $\vec{\beta}$ real, a propagação ocorre em meio sem perdas. Substituindo $\vec{D}$ e $\vec{H}$ na equação de Maxwell, referente às leis de Ampère e de Faraday, vêm:

$$\vec{\nabla}\times\vec{H} = i\,\omega\,\vec{D} \tag{4.30}$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = -i\,\omega\,\mu\,\vec{H} \tag{4.31}$$

Aplicando a identidade vetorial:

$$\vec{\nabla}\times\left(\phi\vec{A}\right)=\vec{\nabla}\phi\times\vec{A}+\phi\vec{\nabla}\times\vec{A} \tag{4.32}$$

onde ϕ é escalar e $\vec{A}$ é um vetor arbitrário, resulta

$$-i\vec{\beta}\times\vec{H}+e^{-i\vec{\beta}\vec{r}}\vec{\nabla}\times\vec{H}_0=i\omega\vec{D} \tag{4.33}$$

Como $\vec{\nabla}\times\vec{H}_0=0$, desde que $\vec{H}_0$ não varie na região do espaço de interesse para análise, obtém-se:

$$-\vec{\beta}\times\vec{H}=\omega\vec{D} \tag{4.34}$$

Analogamente,

$$\vec{\beta}\times\vec{E}=\omega\mu\vec{H} \tag{4.35}$$

Outra grandeza importante é a que determina o fluxo de potência, dado pelo *vetor de Poynting*, cujo valor instantâneo é:

$$\vec{s}=\vec{e}\times\vec{h} \tag{4.36}$$

em que $\vec{e}$ e $\vec{h}$ representam os campos elétrico e magnético. Para campos harmônicos no tempo, esta expressão torna-se:

$$\vec{s}=\frac{1}{2}\Re\left\{\vec{E}\times\vec{H}^*+\vec{E}\times\vec{H}e^{i2\omega t}\right\} \tag{4.37}$$

em que o primeiro termo representa o valor médio da densidade de potência e o símbolo $\Re\{\ \}$ seleciona a parte real da operação. De (4.34), (4.35) e (4.36), pode-se ver que $\vec{E}$, $\vec{D}$, $\vec{\beta}$ e $\vec{s}$ estão todos em um plano perpendicular a $\vec{H}$, [16]. Combinando (4.34) e (4.35) tem-se:

$$\vec{D}=-\frac{N^2}{c^2\mu}\left[\hat{b}\times\left(\hat{b}\times\vec{E}\right)\right] \tag{4.38}$$

onde $\hat{b}$ é o vetor unitário na direção de $\vec{\beta}$, c é a velocidade da luz no vácuo e N é o índice de refração. Usando a lei do triplo produto vetorial e considerando que $\hat{b}\cdot\hat{b}=1$, vem:

$$\vec{D}=\frac{N^2}{c^2\mu}\left[\vec{E}-\hat{b}\left(\hat{b}\cdot\vec{E}\right)\right] \tag{4.39}$$

Aplicando (4.4) em (4.39), chega-se a:

$$\begin{aligned} c^2\mu\varepsilon_{11}E_x &= N^2\left[E_x-b_x\left(\hat{b}\cdot\vec{E}\right)\right] \\ c^2\mu\varepsilon_{22}E_y &= N^2\left[E_y-b_y\left(\hat{b}\cdot\vec{E}\right)\right] \\ c^2\mu\varepsilon_{33}E_z &= N^2\left[E_z-b_z\left(\hat{b}\cdot\vec{E}\right)\right] \end{aligned} \tag{4.40}$$

Como são expressões formalmente idênticas, é possível resumi-las em uma componente geral:

$$E_q=\frac{N^2 b_q\left(\hat{b}\cdot\vec{E}\right)}{N^2-c^2\mu\varepsilon_{jj}} \tag{4.41}$$

onde $q=x,y$ ou z e $j=1,2$ ou 3 correspondentes. Multiplicando E_q por b_q e dividindo por $\hat{b}\cdot\vec{E}$, chega-se a:

$$\frac{b_x^2}{N^2-c^2\mu\varepsilon_{11}}+\frac{b_y^2}{N^2-c^2\mu\varepsilon_{22}}+\frac{b_z^2}{N^2-c^2\mu\varepsilon_{33}}=\frac{1}{N^2} \tag{4.42}$$

Uma vez que se admitiu meio sem perdas, a velocidade de propagação correspondente a cada direção é:

$$v_x=\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon_{11}}},\quad v_y=\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon_{22}}},\quad v_z=\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon_{33}}} \tag{4.43}$$

Substituindo (4.43) e $N=c/v_p$ em (4.42) e subtraindo $b_x^2+b_y^2+b_z^2=1$ de ambos os lados, resultam:

$$\frac{b_x^2}{v_p^2-v_x^2}+\frac{b_y^2}{v_p^2-v_y^2}+\frac{b_z^2}{v_p^2-v_z^2}=0 \tag{4.44}$$

$$b_x^2\left(v_p^2-v_y^2\right)\left(v_p^2-v_z^2\right)+b_y^2\left(v_p^2-v_x^2\right)\left(v_p^2-v_z^2\right)+b_z^2\left(v_p^2-v_x^2\right)\left(v_p^2-v_y^2\right)=0 \qquad (4.45)$$

Considerando que em um cristal uniaxial $v_z = v_e$ e $v_x = v_y = v_o$, (4.45) fica:

$$\left(v_p^2-v_o^2\right)\left[\left(b_x^2+b_y^2\right)\left(v_p^2-v_e^2\right)+b_z^2\left(v_p^2-v_o^2\right)\right]=0 \qquad (4.46)$$

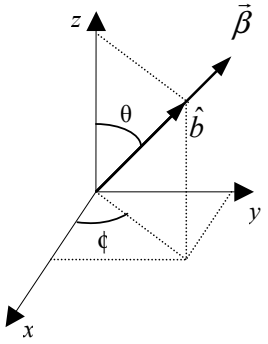


Figura 4.2 - *Direção arbitrária de propagação em um meio qualquer em que se estuda a birrefringência.*

A direção de propagação é a dada pelo vetor $\vec{\beta} = \beta\hat{b}$. No sistema triortogonal da Figura 4.2, a direção é determinada pelo ângulo θ em relação ao eixo *z* (elevação) e o ângulo ϕ (azimute) em relação ao eixo *x*. Pelas projeções da figura, tem-se $b_x = sen\,\theta\cos\phi$; $b_y = sen\,\theta\,sen\,\phi$ e $b_z = \cos\theta$, donde:

$$b_x^2 + b_y^2 = sen^2\theta \qquad (4.47)$$

$$b_z^2 = \cos^2\theta \qquad (4.48)$$

Pode-se reescrever (4.46) como:

$$\left(v_p^2-v_o^2\right)\left[sen^2\theta\left(v_p^2-v_e^2\right)+\cos^2\theta\left(v_p^2-v_o^2\right)\right]=0 \qquad (4.49)$$

identidade satisfeita com dois valores possíveis de v_p^2:

$$\begin{cases} v_{p_1}^2 = v_o^2 \\ v_{p_2}^2 = v_o^2 \cos^2 \theta + v_e^2 sen^2 \theta \end{cases} \tag{4.50}$$

Uma das ondas propaga-se como se estivesse em um meio isotrópico, com sua velocidade de fase independente da direção de propagação e denominada onda ordinária, mencionada no início deste tratamento. A outra apresenta velocidade de fase dependente da direção de propagação, identificada como onda extraordinária. Estas ondas possuem polarizações próprias, referindo-se às direções de seus campos. A Figura 4.3 ilustra como um feixe de luz não-polarizada propagando-se em uma direção arbitrária, pode ser separado em dois, caracterizando a dupla refração, [16].

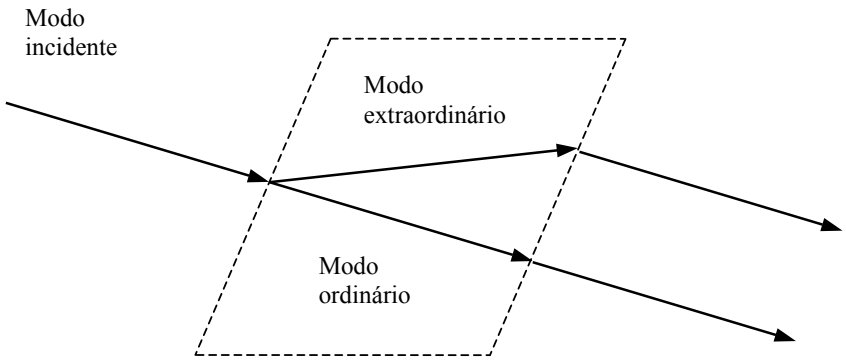


Figura 4.3 - *Feixe de luz não-polarizada separado em dois outros por um cristal birrefringente.*

4.4 Conseqüências da birrefringência sobre a polarização

A dispersão por modo de polarização (PMD) é conseqüência da birrefringência da fibra sobre a polarização de um feixe óptico. É verificada como um atraso entre as componentes dos campos ortogonais *x* e *y* ao se propagarem em uma distância *L*. Na prática, representará uma dispersão do sinal óptico no tempo. Este atraso poderá acarretar em perda parcial do feixe guiado e alterações na informação. Diferentemente do que ocorre com a dispersão cromática, que é um fenômeno relativamente estável em toda a extensão do enlace, a PMD varia aleatoriamente, [12]. Isto ocorre

pelo fato de as causas da birrefringência serem irregularidades geométricas ou variações aleatórias do índice de refração, interpretadas como imperfeições do núcleo da fibra. Em um mesmo cabo óptico encontram-se fibras com baixa e com alta PMD. Pelo mesmo motivo, uma fibra em um lance de cabo sem emenda, pode ter baixa PMD em um trecho e alta em outro, provocada por um esforço pontual ou decorrente do processo de fabricação.

Se as velocidades de grupo dos modos de polarização ortogonais são v_{gx} e v_{gy}, então a diferença de tempo durante a propagação na fibra, em uma distância L, será:

$$\Delta\tau = \left| \frac{L}{v_{gx}} - \frac{L}{v_{gy}} \right| \tag{4.51}$$

Em função das variações aleatórias da birrefringência ao longo da fibra e de seu valor variar com o tempo e com a temperatura, (4.51) não pode ser utilizado diretamente para estimar a PMD, [12]. Estas variações tendem a equalizar o tempo de propagação das duas componentes polarizadas, [2]. Em seu lugar, recomenda-se empregar levantamentos estatísticos e estimar valores médios para dimensionar o efeito.

Para longas distâncias, caracteriza-se a PMD como o valor médio do atraso diferencial de grupo, [12]. Para $L >$ 0,1 este valor pode ser calculado por, [2] [5]:

$$\langle \Delta\tau \rangle = D_{PMD} \sqrt{L} \tag{4.52}$$

sendo D_{PMD} um fator obtido das previsões estatísticas, denominado *parâmetro de PMD* e expresso em $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. A representação $\langle \Delta\tau \rangle$ indica o valor médio (ou primeiro momento) das várias medidas de dispersão temporal. A distância máxima poderá ser obtida por:

$$L = (\langle \Delta\tau \rangle / D_{PMD})^2 \tag{4.53}$$

4.5 Limites recomendados

A Recomendação G.652 do ITU atribuía um parâmetro de PMD máximo de $0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. A versão 6 desta recomendação, dividiu-a em categorias G.652.A, G.652.B, G.652.C e G.652.D, com limites diferentes. Em duas delas, G.652.B e

G.652.D, os valores foram alterados para $0{,}2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, [3]. Atualmente, muitos fabricantes garantem cabos com um parâmetro de PMD limitados a $0{,}1\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. Aproximadamente 90% dos cabos ópticos instalados nos Estados Unidos e na Europa seguem os valores da recomendação G.652, [12]. No Brasil, o quadro é semelhante e as operadoras possuem grande número de *fibras apagadas* em cabos instalados. Muitos cabos seguem a recomendação de $0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, prevista para as categorias G.652.A e G.652.C. Além disto, como a PMD altera-se com o tempo, os valores observados são diferentes dos recomendados e freqüentemente apresentam D_{PMD} na ordem de 0,5 a $2\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, [5] [12] [22].

Foram medidos os valores de PMD para fibras de três tipos diferentes de cabos. As medições foram realizadas nas condições apresentadas na Tabela 4.1, [12]. O maior valor, encontrado para o cabo aéreo, foi atribuído a mudanças de temperatura e pressão exercida pelo vento, [12]. Outros ensaios em mais de 2000 fibras instaladas no Brasil, mostraram que 19% das fibras testadas apresentaram valores de D_{PMD} acima de $0{,}5\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, com o pior caso no valor de $3{,}1\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, [23].

Tabela 4.1 – *Resultados experimentais relativos ao parâmetro D_{PMD} para três tipos diferentes de cabos ópticos*, [12].

	Comprimento	Valores de D_{PMD}	Condições
Cabo 1	36,0 km	$0{,}028\ \text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	Temperatura controlada
Cabo 2	48,8 km	$0{,}29\ \text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	Cabo enterrado
Cabo 3	48,0 km	$1{,}28\ \text{ps}/\sqrt{\text{km}}$	Cabo aéreo

Utilizando o programa Matlab® e aplicando os valores de L e D_{PMD} em (4.53), foram traçados os gráficos das Figuras 4.4 e 4.5, descrevendo a dispersão provocada pela PMD na fibra, em função da distância, [24] [25].

Em sistemas que operam com a hierarquia digital síncrona (SDH), identificam-se as designações STM-4, STM-16, STM-64 e STM-256, conforme a taxa de bits transmitidos. Os valores são respectivamente 622Mb/s, 2,5Gb/s, 10Gb/s e 40Gb/s. Na Figura 4.4, o sistema STM-64, que opera com 10Gb/s, e o STM-256 de 40Gb/s, precisam ter projetos elaborados com cautela, mesmo empregando uma fi-

bra com baixa D_{PMD}, pois as distâncias limítrofes são pequenas comparadas com as utilizadas nas redes de telecomunicações. No caso do STM-64 (10Gb/s), com $D_{PMD} = 0{,}5\ \text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, a distância máxima admissível será de 400km. Para estas análises, a máxima dispersão aceita foi de 10% do tempo de bit (T_b) do sistema, [5]:

$$\Delta\tau = 10\% T_b \tag{4.54}$$

Esta distância já limita muitos projetos previstos para distâncias longas que utilizem amplificadores ópticos.

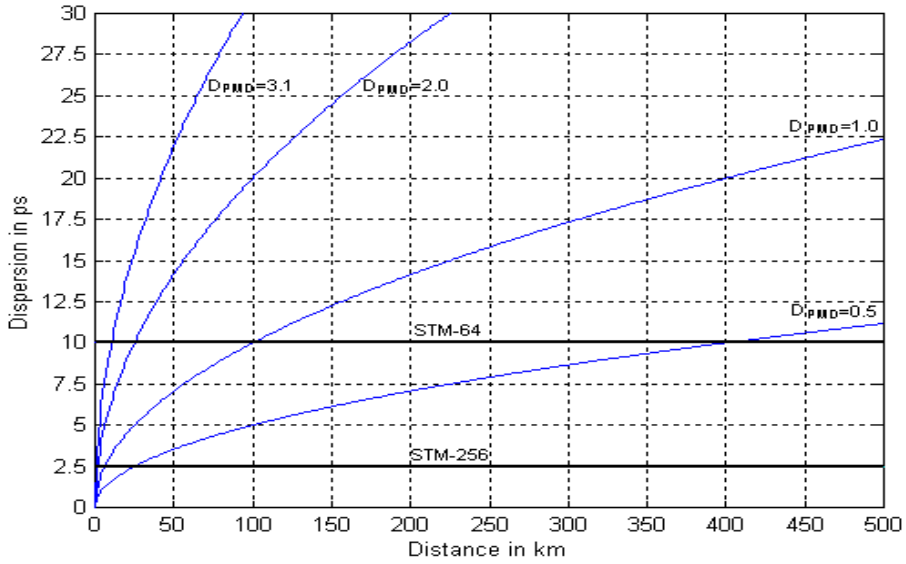


Figura 4.4 - *Limites impostos pela PMD para o STM-64 (10Gb/s) e para o STM-256 (40Gb/s) em função do comprimento do enlace.*

O mais grave é que quando se faz a mesma análise para uma $D_{PMD} = 1{,}0\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ a distância máxima admissível é reduzida para 100km e para 25km para $D_{PMD} = 2{,}0\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. Esta situação é mais alarmante quando houver necessidade de aumentar a taxa do sistema. Para o STM-256 (40Gb/s), com $D_{PMD} = 0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, a distância máxima será de apenas 25km. Considerando que este valor pode ser aumentado pelas razões apresentadas, se alcançar $D_{PMD} = 1{,}0\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, a distância máxima será reduzida para 6,25km.

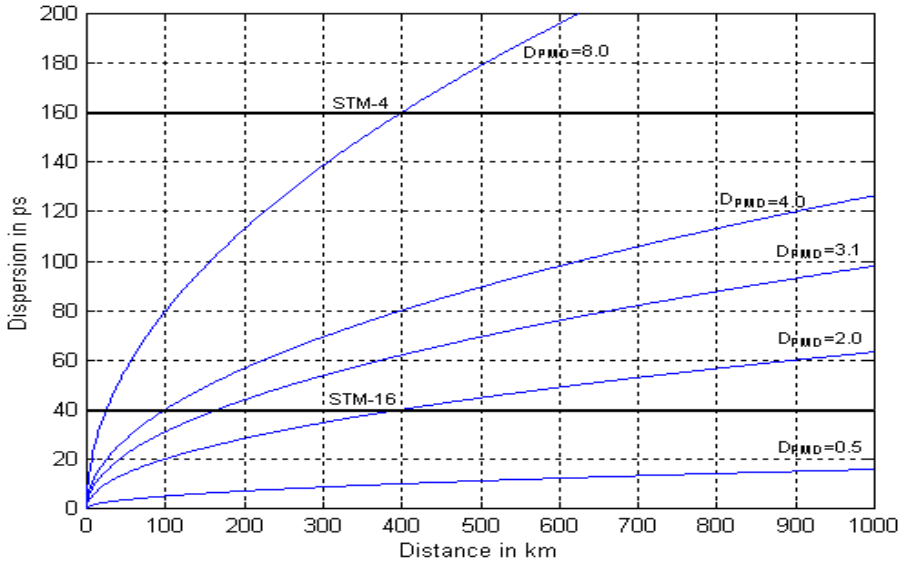


Figura 4.5 - *Limites impostos pela PMD para o STM-4 (622Mb/s) e para o STM-16 (2,5Gb/s) em função do comprimento do enlace.*

Na Figura 4.5, verifica-se que para taxas menores, tal como STM-4, de 622Mb/s, seria necessária uma fibra com uma $D_{PMD} = 8{,}0\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ para o sistema ficar limitado a 400km. Logo, é pouco provável que a PMD venha a prejudicar o seu desempenho. Com relação ao STM-16 (2,5Gb/s), uma fibra com $D_{PMD} = 2{,}0\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ limitará a distância em 400km.

A ITU define dois tipos de receptor, conforme as influências do ruído. O receptor que emprega o diodo PIN como fotodetector é identificado como capaz de fornecer sinal sem ruído ou de muito baixo valor. O que utiliza fotodetector de avalanche (APD), com mecanismos de ruído mais severos [26], é referido como dispositivo com sinal dependente do ruído, [27].

A recomendação de 10% para limites de sistemas baseia-se em comprovações que para uma dispersão de $0{,}3T_b$ a penalidade de potência prevista é de $0{,}5\,\text{dB}$ para um receptor com diodo PIN, cuja influência de espúrios é determinada pelo ruído térmico e $1{,}0\,\text{dB}$ para receptor com sinal dependente do ruído, [5] [27]. Era esperado um limite próximo de 30% também para o sistema avaliado sob o ponto de vista da taxa de erro de bit, pois a penalidade imposta poderá gerar erros na transmissão do

sinal. A recomendação G.691 da ITU apresenta o gráfico reproduzido na Figura 4.6 que mostra a relação entre a penalidade e a dispersão causada pela PMD, [27]. Seguindo este raciocínio e considerando a necessidade de uma margem de segurança para garantir uma penalidade máxima de 1,0 dB durante a operação normal, a dispersão média deverá ser de $0{,}1T_b$, [5]. Logo, em (4.54) $\Delta\tau$ pode ser apresentada como um percentual do tempo de bit do sinal:

$$\Delta\tau = T_b\, x\% \tag{4.55}$$

sendo x o percentual de dispersão em relação a T_b.

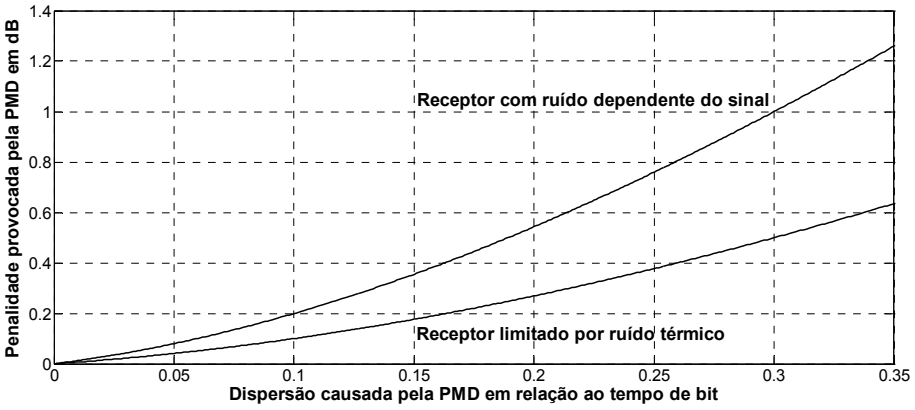


Figura 4.6 – *Relação entre a penalidade do receptor e a dispersão causada pela PMD em relação ao tempo de bit.*

Com a plataforma computacional da empresa VPI ®, foram realizadas simulações para verificar a taxa de erro de bit (BER) do sistema. Todos os efeitos de atenuação e dispersão cromática na fibra foram compensados, resultando em perdas decorrentes apenas da PMD. Na Figura 4.7, tem-se uma amostragem da taxa de erro de bit de um sistema operando em 40Gb/s (STM-256) com $D_{PMD} = 0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. Em um enlace de 25km, a influência da PMD é nula, caracterizada por manter a BER estável em zero em toda a simulação. Isto ratifica a recomendação de uma dispersão máxima de 10% do tempo de bit, pois até este limite não haverá erros nem prejuízos sobre o desempenho do sistema.

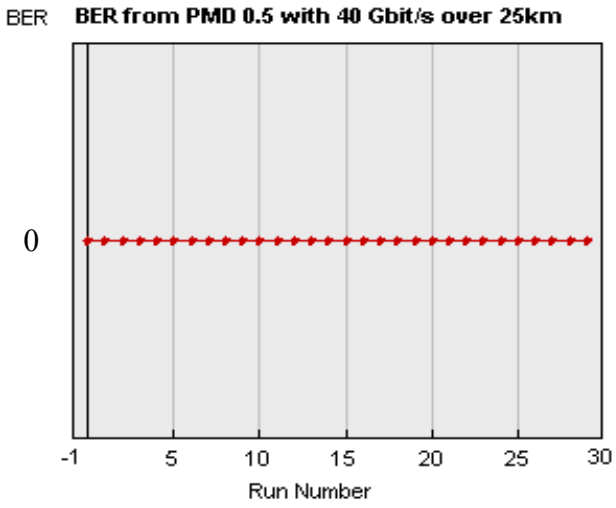


Figura 4.7 – *30 amostras nulas da taxa de erro de bit para uma taxa de transmissão de 40 Gb/s (STM-256), com* $D_{PMD} = 0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ *em 25*km.

Realizaram-se simulações para identificar os limites dos sistemas em análise. Definiu-se uma taxa de erro de bit máxima de 10^{-9}, correspondente a um bit errado para cada bilhão de bits transmitidos. Este valor é utilizado em contratos de garantia de qualidade de serviços entre operadoras e clientes corporativos. Serão apresentados os resultados das simulações e algumas recomendações com base nos resultados.

Capítulo 5

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

5.1 Características e propriedades do programa de simulação

Serão apresentadas as simulações e tecidas algumas considerações com base em seus resultados. Utilizou-se uma configuração do programa Virtual Photonics Incorporated (VPI ®), que possui as características descritas a seguir.

1- Fonte óptica. Bloco *TxExtModLaser_vtmg1*. A fonte utilizada foi um laser com potência óptica de transmissão de 1 mW, freqüência central de 193,1 THz (1553,6 nm). A escolha da terceira janela de transmissão foi pelo fato de ser a que apresenta menor atenuação. Corresponde, ainda, à faixa de operação do amplificador de fibra de sílica dopada com érbio, utilizado regularmente em enlaces de longas distâncias. É possível ajustar a taxa de bits de modulação nessa fonte conforme a padronização desejada. Da mesma maneira, pode-se configurar a sua largura espectral e escolheu-se 0,1nm, correspondente a 12,5GHz.

2- Fibra óptica. Bloco *Fiber_NLS.* Para que o efeito provocado pela PMD não fosse influenciado por outros fatores, a atenuação e a dispersão cromática na fibra foram anuladas. A fibra escolhida permite que a onda propagante inclua os efeitos descritos por meio da equação não-linear de Schrödinger – NLS, [5] [28].

3- Fotodetector. Bloco *photodiodePin_vtms5*. O fotodetector utilizado foi um fotodiodo *pin* (PPD), com uma responsividade de $1\,\mathrm{A/W}$ e densidade espectral de

ruído térmico de 10 $\mathrm{pA}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$. Esta opção refere-se à análise do receptor cuja limitação é dada principalmente pelo ruído térmico, [27].

4- Taxa de amostragem. A taxa de amostragem utilizada foi 16 vezes maior que a taxa de bit. Esta relação permite uma boa visualização do diagrama de olho sem aumentar muito o tempo da simulação, [12].

5- Apresentação dos resultados. Bloco *Vixy_vtms1*. Este bloco apresenta, para cada simulação, um gráfico com a taxa de erro de bit do sistema.

Os resultados serão para as taxas de transmissão de 2,5Gb/s, 10Gb/s, 20Gb/s, 40Gb/s e 80Gb/s. Para o cálculo das distâncias foram utilizadas (4.53) e (4.55). Realizaram-se simulações com valores percentuais da dispersão em relação ao tempo de bit do sinal até o ponto onde a taxa de erro de bit do sistema correspondesse a 10^{-9}. Verificou-se que as apresentações do diagrama de olho não influíram na avaliação final até este limite especificado de taxa de erro.

As simulações foram realizadas com mil amostras, preferencialmente. Escolheu-se este número com base no tempo gasto para cada simulação (aproximadamente uma noite) que permitisse conclusões confiáveis. Entretanto, foi considerado suficiente os tempos em que a simulação apresentasse amostras superando o limite esperado. A segunda condição para reduzir o número de amostras foi o tempo de simulação. Os valores foram modificados para os casos com distâncias acima de mil quilômetros, que necessitavam de alguns dias para se obter um resultado com mil amostras. Um exemplo são as simulações para a taxa de 2,5Gb/s com $D_{PMD} = 0{,}5\mathrm{ps}/\sqrt{\mathrm{km}}$, que foram reduzidas para 925 amostras para não ultrapassar o prazo de uma semana. Em alguns casos, por motivos diversos, foi necessário abortar algumas simulações, sendo este o terceiro motivo pelo qual alguns resultados não são apresentados com mil amostras. Nessas outras condições, foram realizados novos ensaios.

As simulações que apresentaram resultados dentro dos especificados, mas em condições próximas do limite, de 10^{-12} a 10^{-11}, foram refeitas. Quando o resultado foi de 10^{-10}, foram refeitas mais de uma vez, para reduzir a margem de erro. Partindo de estudos preliminares, demonstrando que para as condições descritas este limite

estaria entre 24% e 30% de dispersão, realizaram-se as simulações compiladas nas tabelas apresentadas a seguir. Os resultados de cada uma estão no Anexo 1. O número de simulações para cada caso é apresentado entre parênteses nas Tabelas 5.2, 5.4, 5.6, 5.8 e 5.10. Diversas simulações não foram apresentadas por estarem fora dos limites das tabelas e com resultados que não modificavam as avaliações.

Como já descrito e ilustrado na Figura 4.6, com uma dispersão de 30% do tempo de bit espera-se uma penalidade de potência de 0,5dB se o receptor for limitado por ruído térmico e de 1,0dB se o sistema estiver operando com um receptor com ruído dependente do sinal, [27].

A Figura 5.1, apresenta o resultado de um sistema com taxa de transmissão de 40Gb/s, correspondente ao sistema STM-256, transmitido em uma fibra com $D_{PMD} = 0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. Para uma dispersão de 28% do tempo de bit, de (4.53) calcula-se a distância de 196km. Fazendo a simulação com estes dados, pode ocorrer uma taxa de erro de 10^{-6}, que não atende às condições pré-definidas. Na Figura 5.2, o STM-256, com $D_{PMD} = 0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, em 182,25km, distância calculada para uma dispersão de 27% do tempo de bit, verifica-se uma taxa de erro de 10^{-10}, que é o alvo desta análise, pois 10^{-9} será insatisfatório.

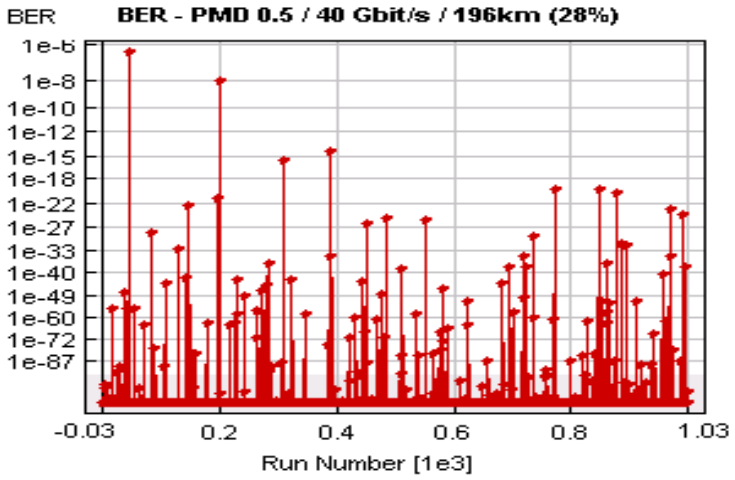


Figura 5.1 - *1000 amostras da taxa de erro de bit para uma taxa de 40 Gb/s (STM-256), com* $D_{PMD} = 0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ *em 196*km*, que corresponde a 28% do tempo de bit.*

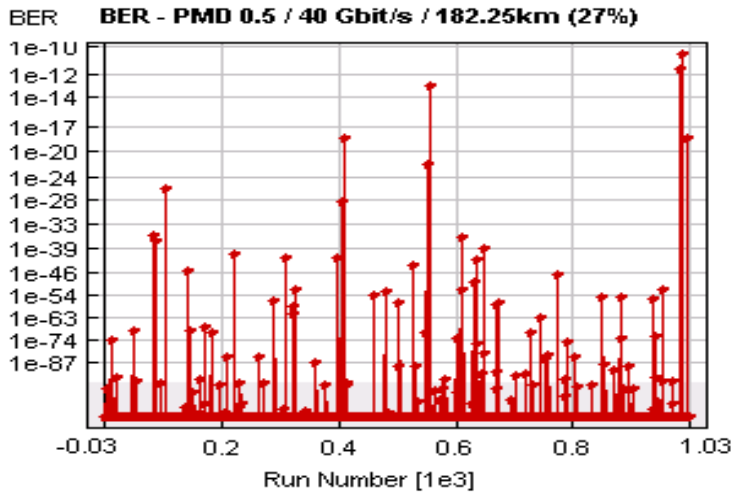


Figura 5.2 - *1000 amostras da taxa de erro de bit para uma taxa de transmissão de 40 Gb/s (STM-256), com* $D_{PMD} = 0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ *em 182,25*km, *que corresponde a 27% do tempo de bit.*

Desta forma, para o sistema especificado, conclui-se que, apesar da recomendação para o valor máximo de dispersão igual ou inferior a 10% do tempo de bit, a dispersão só prejudicará sua qualidade e seu desempenho se for maior ou igual a 28%. Esta margem de segurança está compatível com experiências que admitem a penalidade e uma dispersão máxima de 30% do tempo de bit, [5]. Foram realizadas as demais simulações, avaliando o limiar de dispersão, de acordo com a taxa de transmissão de bits e o coeficiente de dispersão por modo de polarização.

Serão apresentados os resultados destas simulações para taxas de transmissão de 2,5Gb/s, 10Gb/s e 40Gb/s e D_{PMD} de $0{,}1\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, $0{,}2\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, $0{,}5\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, $1{,}0\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, $2{,}0\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, $3{,}1\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, $4{,}0\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ e $8{,}0\,\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. O valor $D_{PMD} = 0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ é o mais utilizado por ser o definido na recomendação G.652 do ITU-T, nas tabelas de atributos G.652.A e G.652.C, [3]. O valor $D_{PMD} = 0{,}2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ aparece na recomendação G.652 do ITU-T, nos atributos G.652.B e G.652.D e o valor $D_{PMD} = 0{,}1\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ é utilizado por fabricantes de fibra óptica como garantia de qualidade de seu produto, [3]. Selecionou-se também $D_{PMD} = 3{,}1\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, pois em estudos com mais de 2000 fibras instaladas no Brasil este foi o pior valor verificado, [23]. Como um limite muito prejudicial para o enlace, admitiu-se

$D_{PMD} = 8{,}0\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. Os valores de $D_{PMD} = 1{,}0\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, $D_{PMD} = 2{,}0\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ e $D_{PMD} = 4{,}0\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ foram utilizados como auxiliares na avaliação, destacando-se $D_{PMD} = 2{,}0\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ considerado como um valor alto, [5].

A primeira tabela de cada taxa de transmissão apresenta as distâncias calculadas para os valores de dispersão do sistema, de acordo com (4.53). A segunda tabela indica as taxas de erro de bit de cada simulação. Os limiares estão destacados em negrito e grifados. A partir dos resultados para taxas de transmissão de 2,5Gb/s, 10Gb/s e 40Gb/s, verificaram-se valores superiores aos esperados, ou seja, acima dos 30% de dispersão do tempo de bit, chegando-se até a 55%.

Para melhor avaliação, foram feitas novas simulações com taxas de transmissão de 20Gb/s e 80Gb/s. Especificaram-se coeficientes de dispersão que respeitassem a condição de:

$$D_{PMD} R \geq 40 \cdot 10^{-3}\,\text{bit}/\sqrt{\text{km}} \qquad (5.1)$$

com D_{PMD} dada em $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ e R, sendo a taxa de transmissão de bits em gigabits por segundo. Esta condição é conseqüência de análise das Tabelas 5.2, 5.4 e 5.6, pois quando (5.1) for respeitada é que se observam valores superiores aos esperados.

5.2 Simulações para a taxa de transmissão de 2,5Gb/s

Em sistemas STM-16, de (4.53) calcula-se o comprimento máximo do enlace. Para um valor do parâmetro D_{PMD} de $0{,}5\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, o comprimento máximo é da ordem de 40.000km. Assim, não foram realizadas as simulações para os valores de $D_{PMD} = 0{,}1\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ e $D_{PMD} = 0{,}2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, pois as distâncias seriam ainda maiores.

A Tabela 5.1 apresenta os comprimentos máximos dos enlaces calculados. Utilizando esses valores, foram feitas as simulações no programa VPI ® para se verificar a taxa de erro de bit. Todas as simulações estão no Anexo 1 e os valores correspondentes na Tabela 5.2. Obtiveram-se limiares entre 26% e 28% da dispersão do tempo de bit para BER = 10^{-9}. Estes valores estão coerentes com os esperados, da ordem de 30% de dispersão do tempo de bit.

Tabela 5.1 - *Comprimentos máximos de enlaces calculados para a taxa de 2,5Gb/s.*

	x = Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	24%	25%	26%	27%	28%	29%	30%
0,5	36864	40000	43264	46656	50176		
1,0	9216	10000	10816	11664	12544	13456	
2,0	2304	2500	2704	2916	3136	3364	3600
3,1	956	1040	1125	1213	1305	1400	1498
4,0	576	625	676	729	784	841	900
8,0	144	156,25	169	182,25	196		

Tabela 5.2 – *Taxa de erro de bit medida para 2,5Gb/s.*

	x = Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	24%	25%	26%	27%	28%	29%	30%
0,5	10^{-24} (1)	10^{-27} (1)	10^{-16} (2)	10^{-10} (3)	**10^{-9}** (2)		
1,0		10^{-15} (1)	10^{-20} (1)	**10^{-6}** (3)	10^{-7} (4)	10^{-6} (1)	
2,0			10^{-22} (1)	10^{-11} (3)	**10^{-9}** (1)	10^{-9} (1)	10^{-9} (1)
3,1	10^{-13} (1)	10^{-20} (1)	10^{-13} (1)	**10^{-7}** (1)	10^{-19} (1)	10^{-11} (1)	10^{-10} (1)
4,0		10^{-25} (1)	10^{-19} (2)	10^{-12} (3)	**10^{-7}** (2)	10^{-11} (1)	10^{-9} (1)
8,0		10^{-12} (2)	**10^{-6}** (2)	10^{-6} (2)	10^{-10} (1)		

Para aumentar a confiabilidade dos resultados, foram refeitas as simulações em valores limites do sistema. Quando o resultado foi pior do que o anterior, alterou-se o valor da tabela, de tal forma que fosse apresentado sempre o pior caso. Um exemplo na Tabela 5.2 é para a dispersão de 27%, considerando que para 28% o resultado já estava aquém do limite de 10^{-9} e que na primeira simulação foi de 10^{-17}. Na segunda simulação foi 10^{-10}, mais próximo do limiar. Neste caso, fez-se uma terceira simulação, obtendo-se 10^{-18} e o valor na tabela é 10^{-10}, pois foi o pior observado.

5.3 Simulações para a taxa de transmissão de 10Gb/s

A taxa de transmissão de 10 Gb/s é utilizada para o sistema STM-64. Da mesma forma que para o STM-16, com $D_{PMD} = 0{,}2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, o comprimento máximo já estava na ordem de quinze mil quilômetros. Esta distância é grande o suficiente para atender as necessidades de projetos e não foram realizadas as simulações para valores menores deste coeficiente.

Tabela 5.3 - *Comprimentos máximos de enlaces calculados para a taxa de 10Gb/s.*

	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	22%	23%	24%	25%	26%	27%	28%
0,2	12100	13225	14400	15625	16900	18225	19600
0,5	1936	2116	2304	2500	2704	2916	3136
1,0	484	529	576	625	676	729	784
2,0	121	132,25	144	156,25	169	182,25	196
3,1	50,3642	55,0468	59,9376	65,0364	70,3434	75,8585	81,5817
4,0	30,25	33,0625	36	39,0625	42,25	45,5625	49
8,0	7,5625	8,2656	9	9,7656	10,5625	11,3906	12,25

Tabela 5.4 - *Taxa de erro de bit medida para 10Gb/s.*

	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)				
D_{PMD}	24%	25%	26%	27%	28%
0,2	10^{-20} (2)	**10^{-7}** (1)	10^{-9} (2)	10^{-7} (1)	10^{-9} (1)
0,5	10^{-20} (2)	10^{-11} (2)	10^{-14} (3)	**10^{-9}** (2)	10^{-8} (3)
1,0	10^{-27} (1)	10^{-19} (2)	10^{-10} (4)	**10^{-9}** (2)	10^{-8} (3)
2,0	10^{-18} (2)	10^{-13} (2)	**10^{-7}** (1)	10^{-7} (1)	10^{-6} (1)
3,1	10^{-21} (2)	10^{-13} (2)	10^{-12} (3)	**10^{-9}** (3)	10^{-6} (2)
4,0	10^{-19} (1)	10^{-18} (1)	10^{-10} (2)	**10^{-3}** (1)	10^{-6} (1)
8,0	10^{-27} (1)	10^{-32} (1)	10^{-22} (1)	10^{-15} (2)	**10^{-9}** (1)

Como no STM-16, na Tabela 5.4 todos os resultados são coerentes com o esperado, com pequena diferença para $D_{PMD} = 0{,}2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, onde o limiar ocorre para a dispersão de 25%. Apesar de ser razoável, é conveniente verificar esta simulação. Na Figura 5.3, observa-se que este valor foi de apenas uma amostra. Descartando-a, a segunda pior já apresenta valor na ordem de 10^{-24}. Para a dispersão de 26%, obteve-se uma BER de 10^{-18}. Foi realizada uma segunda simulação e chegou-se a 10^{-9}. Para a dispersão de 24%, efetuaram-se duas simulações e ambas apresentaram taxa de erro de 10^{-20}. Conclui-se que o limiar realmente está na ordem de 25% da dispersão do tempo de bit. Serão verificados estes limiares, em função da taxa de transmissão de bits do sistema e do coeficiente de dispersão por modo de polarização.

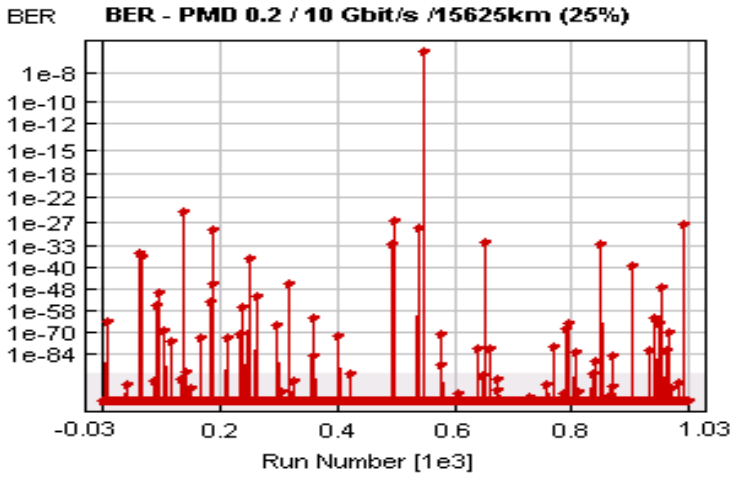


Figura 5.3 - *1000 amostras da taxa de erro de bit para uma taxa de transmissão de 10 Gb/s (STM-64), com* $D_{PMD} = 0{,}2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ *em 15625*km, *que corresponde a 25% do tempo de bit.*

5.4 Simulações para a taxa de transmissão de 40Gb/s

A taxa de 40Gb/s corresponde ao STM-256. Na Tabela 5.6, verifica-se que para uma $D_{PMD} = 0{,}2\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, o limiar está em 25%, como no STM-64. Também neste caso, para a dispersão de 24%, após duas simulações, a pior amostra apresentou taxa de erro de bit de 10^{-18}. Foi realizada uma segunda simulação para a dispersão de 25% e o resultado apresentou taxa de erro de bit de 10^{-19}. Na simulação que apresentou o valor de 10^{-9}, este resultado é devido a ocorrência de apenas uma amostra, sendo verificada uma segunda amostra com 10^{-10} e as demais já com resultados na ordem de 10^{-27}. Estes resultados confirmam que o limiar está em uma dispersão de 25% do tempo de bit, mesmo sendo apenas algumas amostras isoladas, pois para 26% já são verificados erros maiores.

Ainda na Tabela 5.6, verifica-se grande discrepância com relação aos valores esperados para as simulações com valores maiores que $D_{PMD} = 2{,}0\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$. Para $D_{PMD} = 3{,}1\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, a dispersão limite apresentada pela simulação é de 33% do tempo de bit. Para $D_{PMD} = 4{,}0\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, o limite apresentado é de 37% e para $D_{PMD} = 8{,}0\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ é de 55%.

Tabela 5.5 - *Comprimentos máximos de enlaces calculados para a taxa de 40Gb/s.*

	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	24%	25%	26%	27%	28%	29%	30%
0,1	3600	3906,25	4225	4556	4900		
0,2	900	976,5625	1056,25	1139,0625	1225		
0,5			169	182,25	196	210,25	225
1,0			42,25	45,56	49	52,56	56,25
2,0			10,56	11,39	12,25	13,14	14,06
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	28%	29%	30%	31%	32%	33%	34%
3,1	5,10	5,47	5,85	6,25	6,66	7,08	7,52
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	32%	33%	34%	35%	36%	37%	38%
4,0	4,00	4,25	4,52	4,79	5,06	5,35	5,64
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	50%	51%	52%	53%	54%	55%	56%
8,0	2,44	2,54	2,64	2,74	2,85	2,95	3,06

Tabela 5.6 - *Taxa de erro de bit medida para 40Gb/s.*

	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	24%	25%	26%	27%	28%	29%	30%
0,1	10^{-10} (1)	10^{-14} (3)	**10^{-6}** (1)				
0,2	10^{-18} (2)	**10^{-9}** (2)	10^{-9} (2)	10^{-9} (2)	10^{-7} (2)		
0,5			10^{-14} (4)	10^{-10} (4)	**10^{-6}** (3)	10^{-8} (2)	10^{-8} (2)
1,0			10^{-11} (2)	10^{-10} (2)	**10^{-8}** (2)	10^{-7} (1)	10^{-5} (1)
2,0			10^{-18} (1)	10^{-16} (3)	**10^{-8}** (4)	10^{-10} (3)	10^{-7} (1)
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	28%	29%	30%	31%	32%	33%	34%
3,1	10^{-57} (1)	10^{-21} (1)	10^{-24} (1)	10^{-12} (1)	10^{-10} (2)	**10^{-8}** (1)	10^{-9} (2)
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	32%	33%	34%	35%	36%	37%	38%
4,0	10^{-40} (1)	10^{-22} (1)	10^{-17} (1)	10^{-12} (1)	10^{-13} (2)	**10^{-8}** (1)	10^{-7} (1)
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	50%	51%	52%	53%	54%	55%	56%
8,0	10^{-20} (1)	10^{-18} (1)	10^{-14} (1)	10^{-12} (1)	10^{-10} (2)	**10^{-9}** (2)	10^{-5} (1)

Como estes resultados apresentaram dispersão total superior à esperada, foram realizadas simulações para taxas de transmissão de 20Gb/s e 80Gb/s, com obje-

tivo de auxiliar na avaliação. As Tabelas 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam os resultados para parâmetros que respeitam a condição (5.1). Esta condição é conseqüência da análise dos resultados das Tabelas 5.2, 5.4 e 5.6, onde apenas quando:

$$D_{PMD}R \geq 80 \cdot 10^{-3}\,\text{bit}/\sqrt{\text{km}} \tag{5.2}$$

é que são observados valores superiores aos esperados. Portanto, (5.1) garante uma margem de segurança para os resultados gerados.

5.5 Simulações para as taxas de transmissão de 20Gb/s e 80Gb/s

Nas Tabelas 5.8 e 5.10, verificam-se resultados superiores aos esperados na condição (5.2). O caso mais extremo é na simulação com 80Gb/s, para $D_{PMD} = 8{,}0\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, onde a dispersão limite é de 89% do tempo de bit. É notória a inconsistência deste resultado, pois como observado na Figura 4.6, a penalidade cresce exponencialmente com a dispersão e após os 30% a probabilidade de erros no sistema é muito grande. Considerando que estes resultados são superiores aos esperados e em alguns casos inconsistentes, partiu-se para uma análise mais detalhada. Primeiro, foi elaborada a Tabela 5.11 com os resultados de maneira resumida. Em seguida, utilizou-se o programa MatCad para traçar a melhor curva que representasse estes resultados. A partir deste ponto, procurou-se uma equação para o dimensionamento de sistemas que operassem sob a condição (5.2). A Figura 5.4 apresenta o gráfico traçado com o programa.

Tabela 5.7 - *Comprimentos máximos de enlaces calculados para a taxa de 20Gb/s.*

	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	26%	27%	28%	29%	30%	31%	32%
2,0		45,56	49				
3,1		18,96	20,40	21,88	23,41	25	26,64
4,0					14,06	15,02	16
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	35%	36%	37%	38%	39%	40%	41%
8,0	4,79	5,06	5,35	5,64	5,94	6,25	

Tabela 5.8 - *Taxa de erro de bit medida para 20Gb/s.*

	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	25%	26%	27%	28%	29%	30%	31%
2,0	10^{-23} (3)	**10^{-7}** (1)	10^{-4} (1)	10^{-8} (1)			
3,1			10^{-17} (2)	**10^{-8}** (1)	10^{-9} (2)	10^{-9} (3)	10^{-4} (1)
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	30%	31%	32%	33%	34%		
4,0	10^{-15} (2)	**10^{-9}** (2)	10^{-9} (2)	10^{-7} (1)	10^{-6} (1)		
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	35%	36%	37%	38%	39%	40%	
8,0	10^{-15} (1)	10^{-10} (3)	**10^{-7}** (1)	10^{-9} (1)	10^{-7} (1)	10^{-4} (1)	

Tabela 5.9 - *Comprimentos máximos de enlaces calculados para a taxa de 80Gb/s.*

	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	24%	25%	26%	27%	28%	29%	30%
0,5		39,06	42,25	45,56	49		
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	29%	30%	31%	32%	33%	34%	35%
1,0		14,06	15,01	16	17,01	18,06	19,14
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	32%	33%	34%	35%	36%	37%	38%
2,0				4,79	5,06	5,35	
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	42%	43%	44%	45%	46%	47%	48%
3,1			3,15	3,29	3,44	3,59	
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	52%	53%	54%	55%	56%	57%	58%
4,0			2,85	2,95	3,06		
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	85%	86%	87%	88%	89%	90%	91%
8,0				1,89	1,93	1,98	

Na Tabela 5.11, nota-se que sempre que

$$D_{PMD} R \leq 40 \cdot 10^{-3}\,\text{bit}/\sqrt{\text{km}}\,, \tag{5.3}$$

tem-se como limite de operação do sistema valores de dispersão provocados pela PMD variando de 25% a 28% do tempo de bit, coerentes com o previsto. Entretanto,

quando esta condição não for praticada, o limiar altera-se e verificam-se os valores apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.10 – *Taxa de erro de bit medida para 80Gb/s.*

	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	24%	25%	26%	27%	28%	29%	30%
0,5		10^{-23} (1)	**10^{-7}** (1)	10^{-4} (1)	10^{-8} (1)		
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	29%	30%	31%	32%	33%	34%	35%
1,0		10^{-17} (1)	**10^{-8}** (2)	10^{-8} (1)	10^{-7} (2)	10^{-5} (2)	10^{-9} (1)
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	32%	33%	34%	35%	36%	37%	38%
2,0				10^{-14} (1)	10^{-14} (1)	**10^{-9}** (1)	
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	42%	43%	44%	45%	46%	47%	48%
3,1			10^{-15} (1)	10^{-11} (1)	**10^{-9}** (1)	10^{-8} (1)	
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	52%	53%	54%	55%	56%	57%	58%
4,0			10^{-10} (1)	**10^{-9}** (1)	10^{-6} (1)		
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	85%	86%	87%	88%	89%	90%	91%
8,0				10^{-10} (1)	**10^{-9}** (1)	10^{-8} (1)	

Tabela 5.11 - *Limites de dispersão apresentados pelas simulações.*

	Taxa de Transmissão de Bits (Gb/s)				
D_{PMD}	2,5	10	20	40	80
0,1				26%	
0,2		25%		25%	
0,5	28%	27%		28%	26%
1,0	27%	27%		28%	**31%**
2,0	28%	26%	26%	28%	**37%**
3,1	27%	27%	28%	**33%**	**46%**
4,0	28%	27%	**31%**	**37%**	**55%**
8,0	26%	28%	**37%**	**55%**	**89%**

Na Figura 5.4, com a utilização do programa MatCad, estes valores são utilizados para traçar a curva que melhor representa os resultados. Os pontos têm uma

distribuição bastante linear, com coeficiente linear de 19,465 e coeficiente angular de 0,109, de acordo com a equação:

$$f(x) = 0{,}109x + 19{,}465 \tag{5.4}$$

Tabela 5.12 - *Limites de dispersão apresentados pelas simulações em função de* $D_{PMD}R$.

$D_{PMD}R$ ($10^{-3}\,\text{bit}/\sqrt{\text{km}}$)	% limite de dispersão
80	28 a 31%
124	33%
160	37%
248	46%
320	55%
640	89%

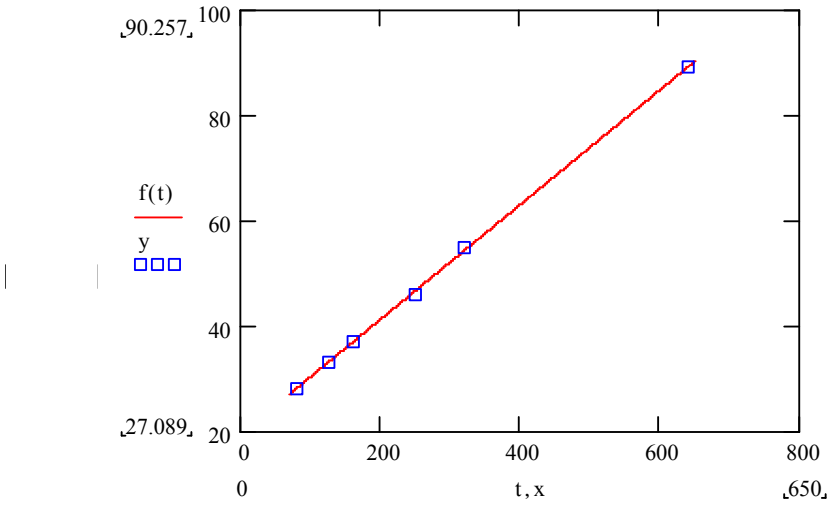


Figura 5.4 - *Segmento de reta que representa os resultados para a condição de* $D_{PMD}R \geq 80 \cdot 10^{-3}\,\text{bit}/\sqrt{\text{km}}$.

Como $D_{PMD}R$ é dado em $10^{-3}\,\text{bit}/\sqrt{\text{km}}$, deve-se considerar o coeficiente angular de 109. Conforme visto no capítulo 4, para cálculo da distância máxima dos sistemas em quilômetros, utiliza-se (4.53), com a dispersão obtida em (4.55), em função do tempo de duração de um bit. Considerando que o valor esperado para todas estas amostras era de aproximadamente 28% e aplicando essas condições em (4.53), tem-se:

$$L = (\langle \Delta\tau \rangle / D_{PMD})^2 = \left[\frac{T_b}{D_{PMD}} \left(\frac{109 \frac{D_{PMD}}{T_b} + 19{,}465}{28} \right) x\% \right]^2$$

$$L = \left[\left(-3{,}893 + 0{,}695 \frac{T_b}{D_{PMD}} \right) x\% \right]^2 \qquad (5.5)$$

Esta equação representa uma nova forma de calcular o limite teórico imposto pela dispersão por modo de polarização em sistemas de alta capacidade, observada a condição (5.2). Como este estudo baseia-se em simulações de um único programa operacional, é recomendável verificar esses resultados utilizando outras plataformas ou testes de laboratório em condições similares às apresentadas.

Capítulo 6

COMENTÁRIOS FINAIS

6.1 Observações gerais

Apresentaram-se diversos fatores para o dimensionamento de sistemas de comunicações de alta capacidade, empregando fibras ópticas. Verificou-se que a equação geralmente utilizada para calcular os limites impostos pela dispersão por modo de polarização (PMD) apresentou resultados superiores aos esperados em algumas simulações. Nessas análises, os valores eram ultrapassados sempre que o produto da taxa de transmissão de bits pelo parâmetro de PMD da fibra [3] fosse maior ou igual a $80 \cdot 10^{-3}\,\text{bit}/\sqrt{\text{km}}$. Utilizando-se o programa MatLab®, obteve-se a correção de previsão da distância máxima do enlace, proposta originalmente em (4.53). De acordo com as simulações realizadas na plataforma computacional de projeto VPI, chegou-se à equação (5.5) recomendada nesta avaliação:

$$L = \left[\left(-3{,}893 + 0{,}695 \frac{T_b}{D_{PMD}} \right) x\% \right]^2 \text{[km]} \qquad (6.1)$$

Ressalta-se que a compensação da PMD envolve procedimentos complexos. Alguns fabricantes realizaram testes com resultado satisfatório para esta compensação, mas em função de dificuldades operacionais e de custos para a implantação, ainda não é recomendável considerar essa opção para dimensionar um sistema. Para projetos em regiões onde existem fibras escuras em cabos instalados, recomenda-se medir a PMD, verificando-se os parâmetros que influem neste problema em cada fibra e identificando as que possuem menor D_{PMD}. Desta forma, definem-se as fibras que serão reservadas para os sistemas de maior capacidade.

6.2 Comentários sobre o trabalho

No capítulo 2, são apresentadas as características de propagação da onda eletromagnética na fibra óptica, analisam-se as soluções da equação de onda e foram determinadas as equações que definem as velocidades de fase e velocidade de grupo. Define-se o índice de refração do meio e avaliam-se os fatores responsáveis pela atenuação do campo óptico guiado. Faz-se a interpretação do feixe guiado segundo a óptica geométrica e avaliam-se os modos de propagação. Demonstra-se a existência de fibras que permitam a propagação de um único modo, empregada nos sistemas de grande capacidade.

No capítulo 3, conceitua-se o fenômeno da dispersão descrevendo os tipos relevantes em fibras ópticas. Cita-se a dispersão modal, destaca-se a dispersão cromática e suas componentes, a dispersão do material e a dispersão de guia de onda. Analisa-se a fibra com dispersão deslocada, na qual se altera a dispersão de guia de onda. Apresentam-se também duas formas de compensar a dispersão cromática, utilizando fibras de dispersão oposta ou que empreguem grades de Bragg.

A dispersão por modo de polarização foi estudada no capítulo 4 por ser objeto fim deste estudo. Define-se a birrefringência e demonstra-se que qualquer que seja o estado inicial de polarização, quando uma onda eletromagnética penetra em um meio anisotrópico o seu comportamento é descrito pela superposição de duas ondas com polarizações ortogonais, cada uma com velocidade própria de propagação. Uma das ondas propaga-se como se estivesse em um meio isotrópico, com sua velocidade de fase independente da direção de propagação, denominada onda ordinária. A outra apresenta velocidade de fase dependente da direção de propagação, identificada como onda extraordinária.

Avaliam-se os limites recomendados para a PMD e observa-se sua característica aleatória, com um valor que varia com o tempo em função de esforços no cabo óptico e por variações de temperatura. Verifica-se que para taxas de transmissão de até 622Mb/s é pouco provável que a PMD prejudique o desempenho do sistema. Para sistemas com taxa de transmissão de 10Gb/s ou superior, o risco da PMD prejudicar o desempenho do sistema é significativo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações feitas com a plataforma de análise e projetos da empresa Virtual Photonics Inc. (VPI). Os resultados evidenciam valores aleatórios do parâmetro da PMD pois, na maioria dos casos, simulações realizadas em condições idênticas apresentam resultados diferentes. Por este motivo, muitos ensaios foram realizados até quatro vezes, com o intuito de chegar a resultados mais confiáveis. Verificou-se que o pior caso pode ser para uma amostra isolada. Um exemplo é a simulação para a taxa de 2,5Gb/s com $D_{PMD} = 1{,}0\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ para 11.664km, correspondente a 27% do tempo de bit, onde a pior amostra é de 10^{-6} e a segunda pior de 10^{-15}. Nas outras duas simulações deste caso, a pior amostra é de 10^{-11}.

Algumas simulações foram refeitas, geralmente para ratificar resultados limítrofes. O número de simulações para cada caso é apresentado entre parênteses junto com os resultados das Tabelas 5.2, 5.4, 5.6, 5.8 e 5.10. Diversos valores não foram apresentados por estarem fora dos limites das tabelas e não modificavam os resultados das avaliações.

6.3 Conclusões e novas propostas

A dispersão por modo de polarização varia com o tempo, principalmente em função das variações de temperatura e esforços mecânicos sobre o cabo. O número de publicações com resultados medidos em campo ainda é reduzido. Não é recomendável elaborar projetos que utilizem taxas de transmissão de 2,5Gb/s ou superiores sem medir a D_{PMD} da fibra. A restrição vale mesmo que o fabricante garanta a entrega de cabos com fibras que tenham valores abaixo dos recomendados.

Fica como sugestão deste trabalho repetir este estudo utilizando outro programa ou, se possível, realizando medidas em campo para estas condições. Após novas análises e confirmando a confiabilidade das informações, é desejável que sejam elaboradas novas recomendações que ressaltem as situações onde os resultados foram diferentes dos esperados. Isto evitará um dimensionamento equivocado de sistemas de alta capacidade.

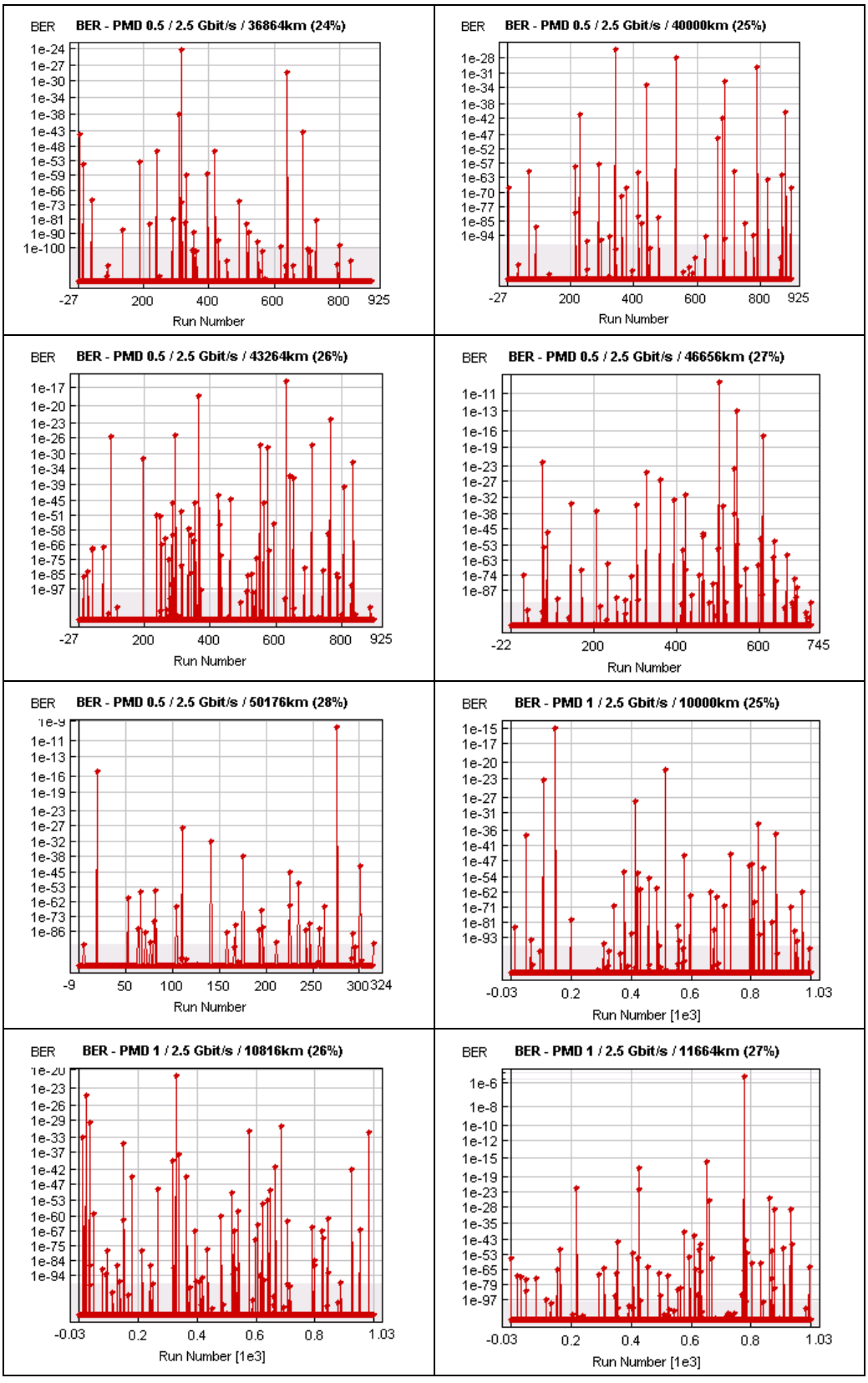
Anexo 1

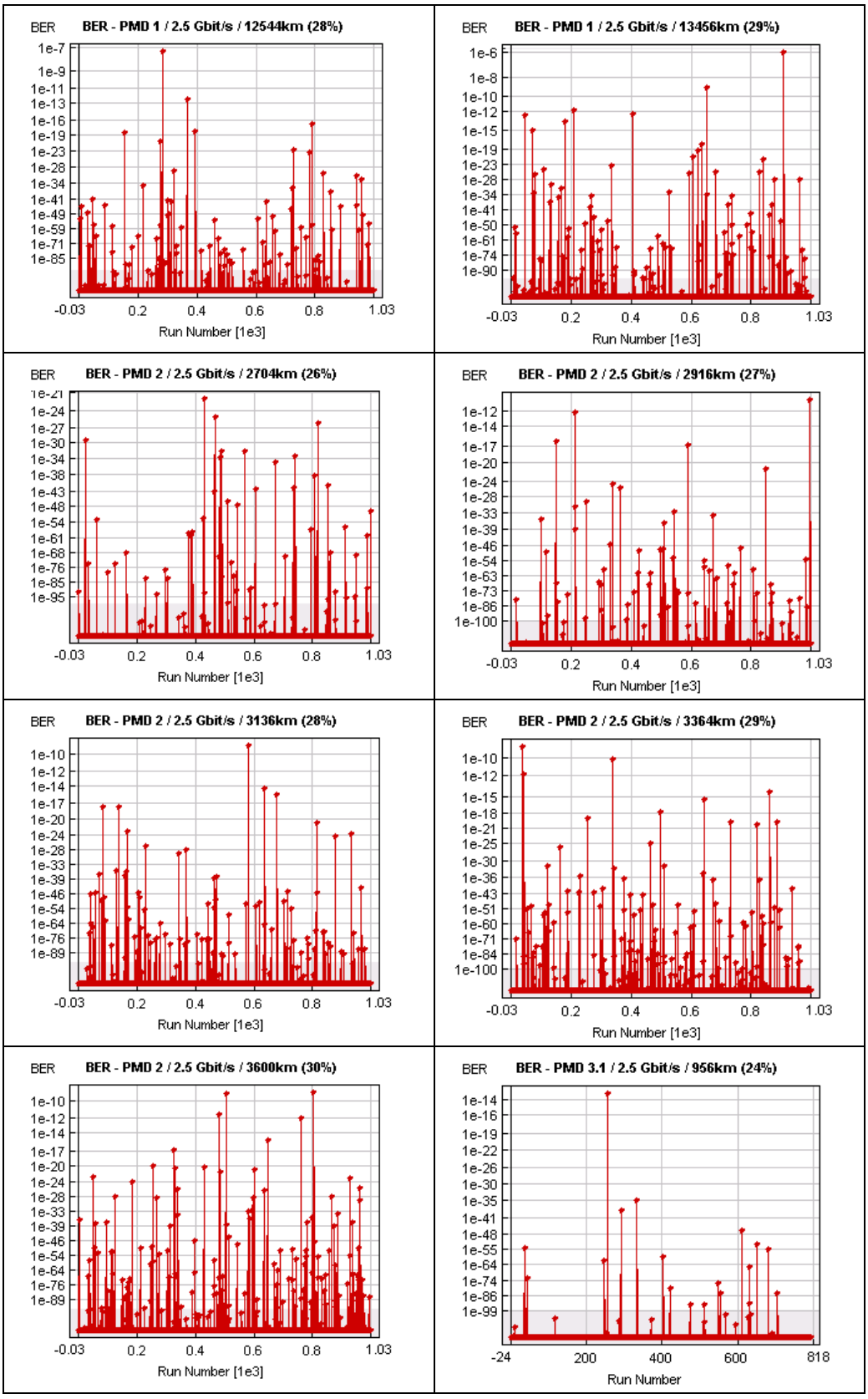
RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

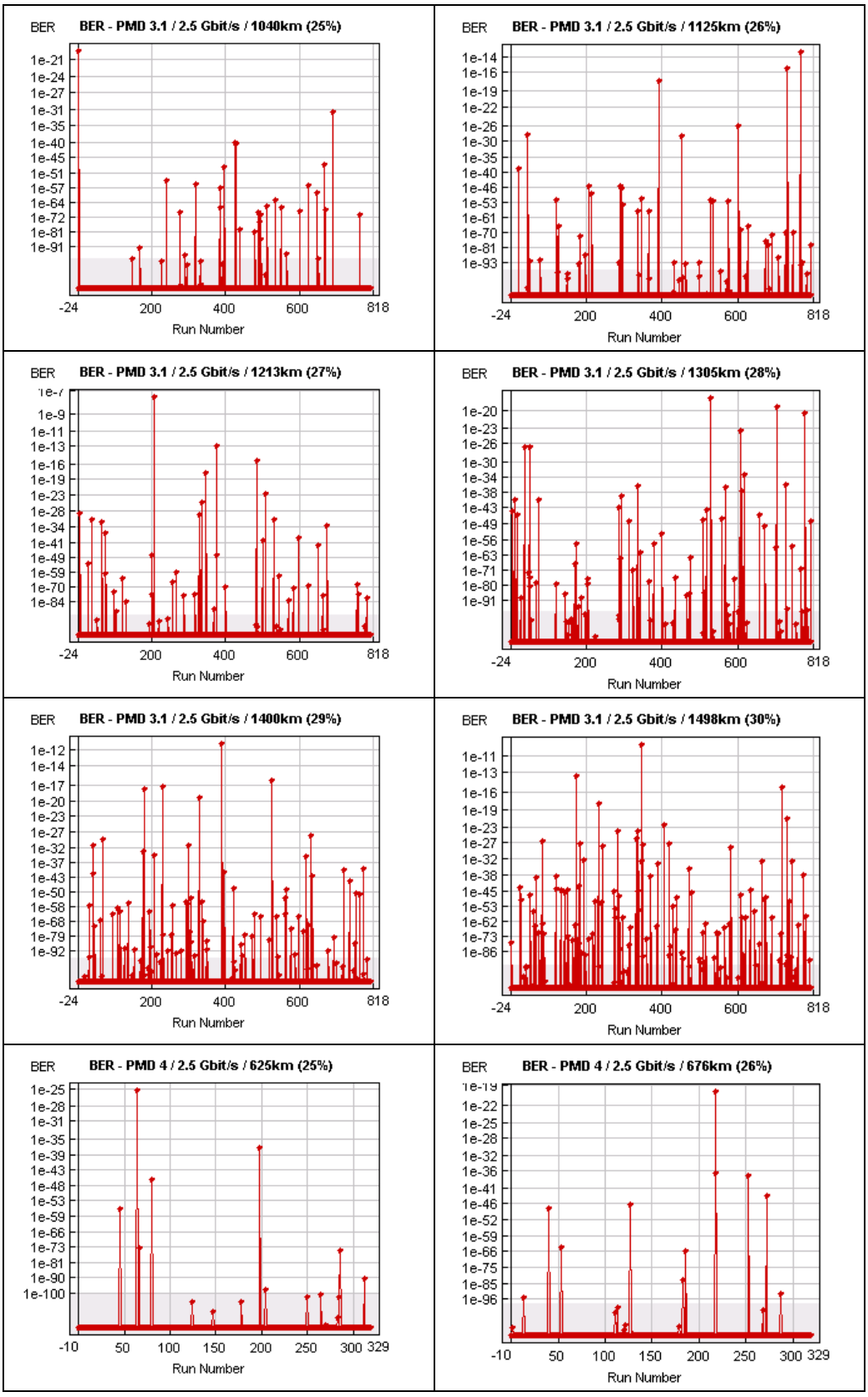
No capítulo 5 foram apresentadas as Tabelas 5.2, 5.4, 5.6, 5.8 e 5.10. Essas tabelas apresentam os resultados das simulações realizadas com a plataforma computacional da empresa VPI. Todos os efeitos de atenuação e dispersão cromática na fibra foram anulados, resultando em perdas decorrentes apenas da PMD. O limite definido para a taxa de erro de bit (BER) foi de $\mathbf{10^{-9}}$. A seguir, são apresentadas essas tabelas e as figuras correspondentes a cada resultado obtido.

Tabela 5.2 – *Taxa de erro de bit medida para 2,5Gb/s.*

	x = Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	24%	25%	26%	27%	28%	29%	30%
0,5	10^{-24} (1)	10^{-27} (1)	10^{-16} (2)	10^{-10} (3)	**10^{-9}** (2)		
1,0		10^{-15} (1)	10^{-20} (1)	**10^{-6}** (3)	10^{-7} (4)	10^{-6} (1)	
2,0			10^{-22} (1)	10^{-11} (3)	**10^{-9}** (1)	10^{-9} (1)	10^{-9} (1)
3,1	10^{-13} (1)	10^{-20} (1)	10^{-13} (1)	**10^{-7}** (1)	10^{-19} (1)	10^{-11} (1)	10^{-10} (1)
4,0		10^{-25} (1)	10^{-19} (2)	10^{-12} (3)	**10^{-7}** (2)	10^{-11} (1)	10^{-9} (1)
8,0		10^{-12} (2)	**10^{-6}** (2)	10^{-6} (2)	10^{-10} (1)		


BER
BER - PMD 0.5 / 2.5 Gbit/s / 36864km (24%)
1e-24
1e-27
1e-30
1e-34
1e-38
1e-43
1e-48
1e-53
1e-59
1e-66
1e-73
1e-81
1e-90
1e-100
-27
200
400
600
800
925
Run Number
BER
BER - PMD 0.5 / 2.5 Gbit/s / 40000km (25%)
1e-28
1e-31
1e-34
1e-38
1e-42
1e-47
1e-52
1e-57
1e-63
1e-70
1e-77
1e-85
1e-94
-27
200
400
600
800
925
Run Number
BER
BER - PMD 0.5 / 2.5 Gbit/s / 43264km (26%)
1e-17
1e-20
1e-23
1e-26
1e-30
1e-34
1e-39
1e-45
1e-51
1e-58
1e-66
1e-75
1e-85
1e-97
-27
200
400
600
800
925
Run Number
BER
BER - PMD 0.5 / 2.5 Gbit/s / 46656km (27%)
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-27
1e-32
1e-38
1e-45
1e-53
1e-63
1e-74
1e-87
-22
200
400
600
745
Run Number
BER
BER - PMD 0.5 / 2.5 Gbit/s / 50176km (28%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-27
1e-32
1e-38
1e-45
1e-53
1e-62
1e-73
1e-86
-9
50
100
150
200
250
300
324
Run Number
BER
BER - PMD 1 / 2.5 Gbit/s / 10000km (25%)
1e-15
1e-17
1e-20
1e-23
1e-27
1e-31
1e-36
1e-41
1e-47
1e-54
1e-62
1e-71
1e-81
1e-93
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 1 / 2.5 Gbit/s / 10816km (26%)
1e-20
1e-23
1e-26
1e-29
1e-33
1e-37
1e-42
1e-47
1e-53
1e-60
1e-67
1e-75
1e-84
1e-94
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 1 / 2.5 Gbit/s / 11664km (27%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-19
1e-23
1e-28
1e-35
1e-43
1e-53
1e-65
1e-79
1e-97
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 1 / 2.5 Gbit/s / 12544km (28%)
1e-7
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-34
1e-41
1e-49
1e-59
1e-71
1e-85
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 1 / 2.5 Gbit/s / 13456km (29%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-19
1e-23
1e-28
1e-34
1e-41
1e-50
1e-61
1e-74
1e-90
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 2.5 Gbit/s / 2704km (26%)
1e-24
1e-27
1e-30
1e-34
1e-38
1e-43
1e-48
1e-54
1e-61
1e-68
1e-76
1e-85
1e-95
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 2.5 Gbit/s / 2916km (27%)
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-54
1e-63
1e-73
1e-86
1e-100
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 2.5 Gbit/s / 3136km (28%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-54
1e-64
1e-76
1e-89
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 2.5 Gbit/s / 3364km (29%)
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-21
1e-25
1e-30
1e-36
1e-43
1e-51
1e-60
1e-71
1e-84
1e-100
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 2.5 Gbit/s / 3600km (30%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-54
1e-64
1e-76
1e-89
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 2.5 Gbit/s / 956km (24%)
1e-14
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-30
1e-35
1e-41
1e-48
1e-55
1e-64
1e-74
1e-86
1e-99
-24
200
400
600
818
Run Number


BER
BER - PMD 3.1 / 2.5 Gbit/s / 1040km (25%)
1e-21
1e-24
1e-27
1e-31
1e-35
1e-40
1e-45
1e-51
1e-57
1e-64
1e-72
1e-81
1e-91
-24
200
400
600
818
Run Number
BER
BER - PMD 3.1 / 2.5 Gbit/s / 1125km (26%)
1e-14
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-30
1e-35
1e-40
1e-46
1e-53
1e-61
1e-70
1e-81
1e-93
-24
200
400
600
818
Run Number
BER
BER - PMD 3.1 / 2.5 Gbit/s / 1213km (27%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-34
1e-41
1e-49
1e-59
1e-70
1e-84
-24
200
400
600
818
Run Number
BER
BER - PMD 3.1 / 2.5 Gbit/s / 1305km (28%)
1e-20
1e-23
1e-26
1e-30
1e-34
1e-38
1e-43
1e-49
1e-56
1e-63
1e-71
1e-80
1e-91
-24
200
400
600
818
Run Number
BER
BER - PMD 3.1 / 2.5 Gbit/s / 1400km (29%)
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-23
1e-27
1e-32
1e-37
1e-43
1e-50
1e-58
1e-68
1e-79
1e-92
-24
200
400
600
818
Run Number
BER
BER - PMD 3.1 / 2.5 Gbit/s / 1498km (30%)
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-27
1e-32
1e-38
1e-45
1e-53
1e-62
1e-73
1e-86
-24
200
400
600
818
Run Number
BER
BER - PMD 4 / 2.5 Gbit/s / 625km (25%)
1e-25
1e-28
1e-31
1e-35
1e-39
1e-43
1e-48
1e-53
1e-59
1e-66
1e-73
1e-81
1e-90
1e-100
-10
50
100
150
200
250
300
329
Run Number
BER
BER - PMD 4 / 2.5 Gbit/s / 676km (26%)
1e-22
1e-25
1e-28
1e-32
1e-36
1e-41
1e-46
1e-52
1e-59
1e-66
1e-75
1e-85
1e-96
-10
50
100
150
200
250
300
329
Run Number

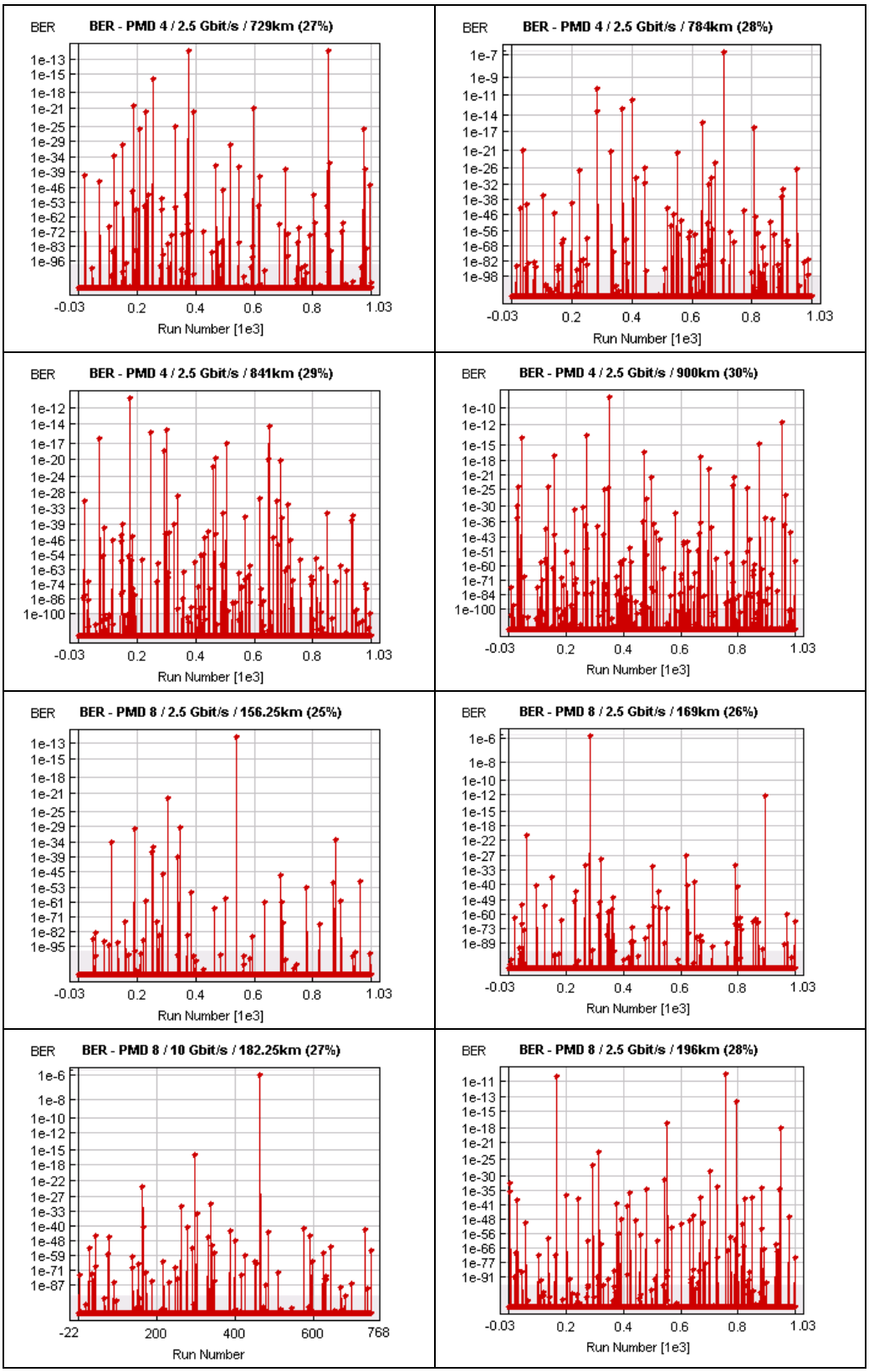
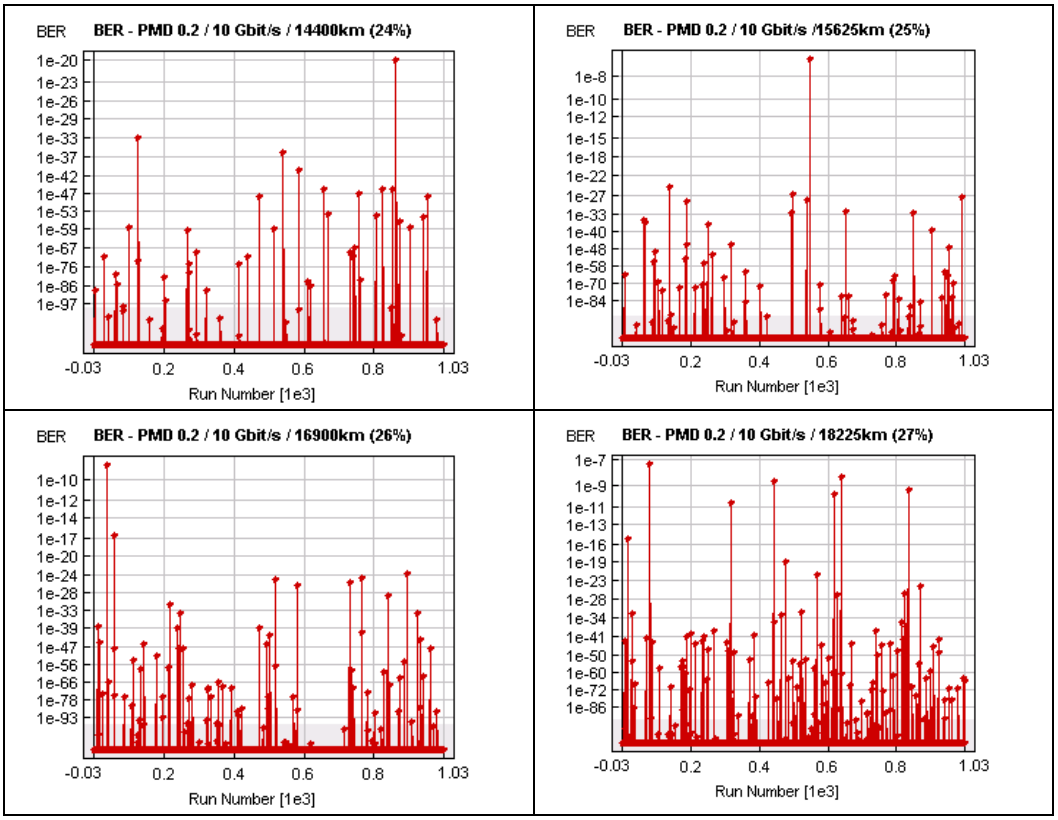
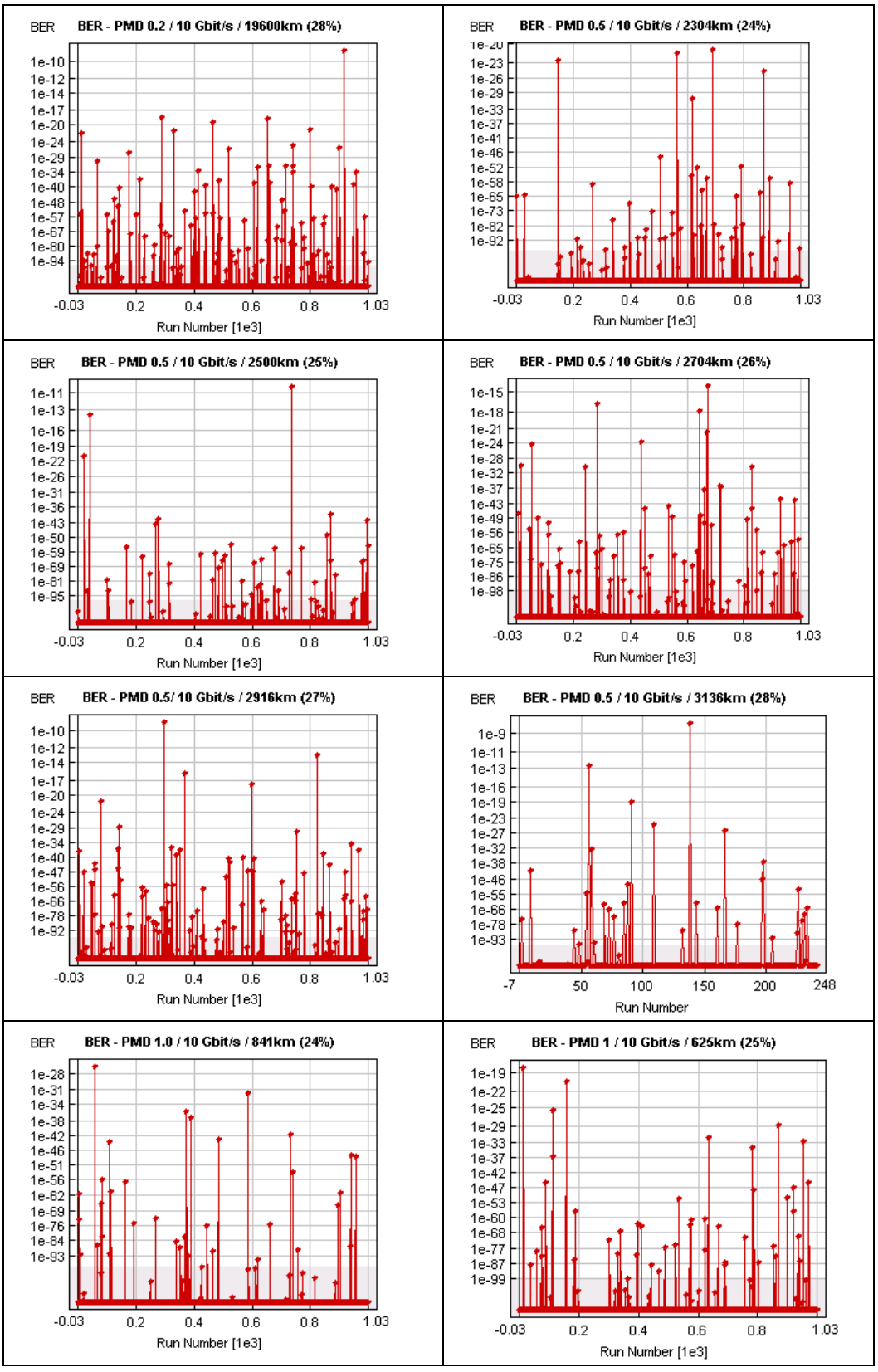
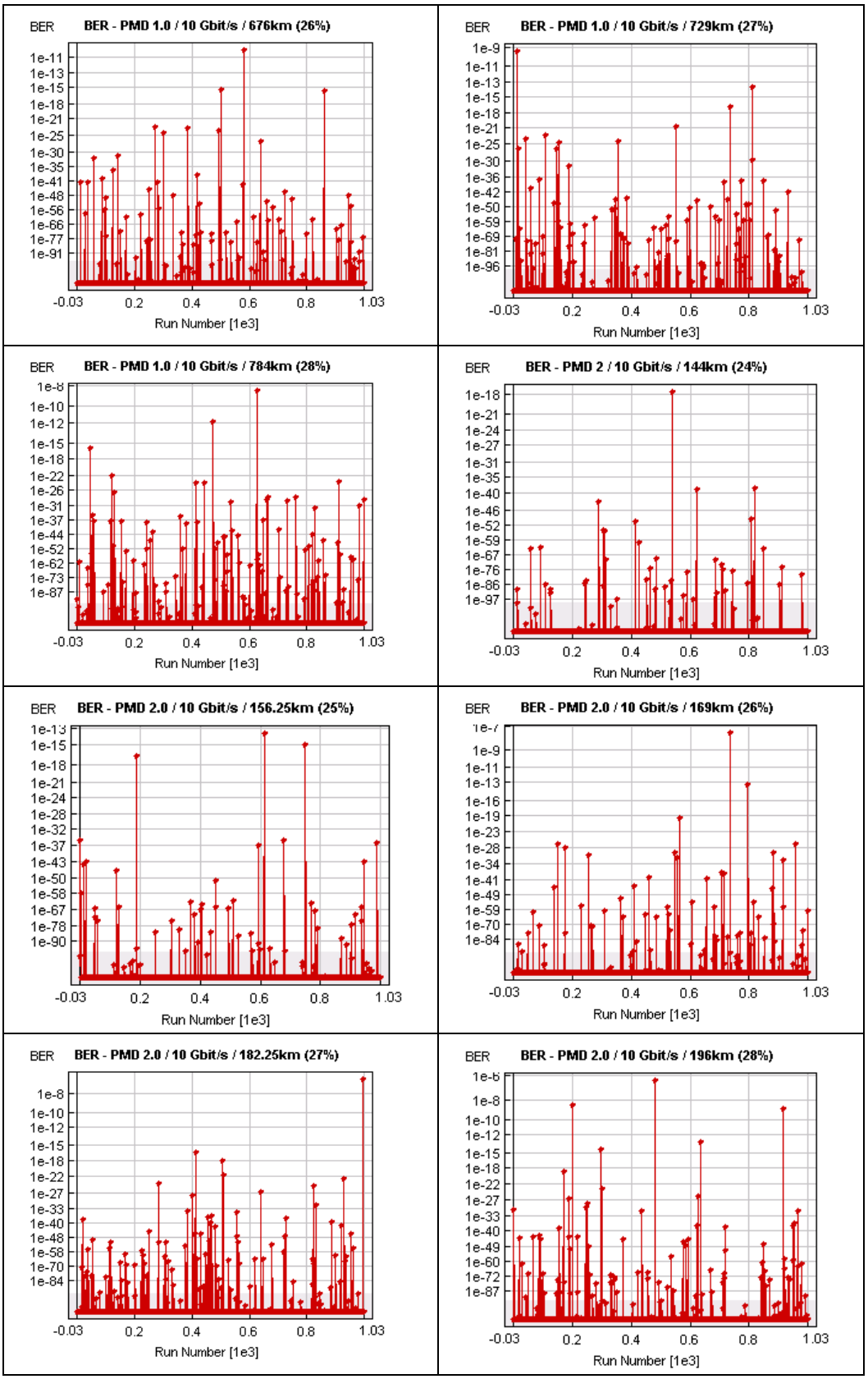

BER
BER - PMD 4 / 2.5 Gbit/s / 729km (27%)
1e-13
1e-15
1e-18
1e-21
1e-25
1e-29
1e-34
1e-39
1e-46
1e-53
1e-62
1e-72
1e-83
1e-96
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 2.5 Gbit/s / 784km (28%)
1e-7
1e-9
1e-11
1e-14
1e-17
1e-21
1e-26
1e-32
1e-38
1e-46
1e-56
1e-68
1e-82
1e-98
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 2.5 Gbit/s / 841km (29%)
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-54
1e-63
1e-74
1e-86
1e-100
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 2.5 Gbit/s / 900km (30%)
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-21
1e-25
1e-30
1e-36
1e-43
1e-51
1e-60
1e-71
1e-84
1e-100
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 8 / 2.5 Gbit/s / 156.25km (25%)
1e-13
1e-15
1e-18
1e-21
1e-25
1e-29
1e-34
1e-39
1e-45
1e-53
1e-61
1e-71
1e-82
1e-95
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 8 / 2.5 Gbit/s / 169km (26%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-49
1e-60
1e-73
1e-89
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 8 / 10 Gbit/s / 182.25km (27%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-48
1e-59
1e-71
1e-87
-22
200
400
600
768
Run Number
BER
BER - PMD 8 / 2.5 Gbit/s / 196km (28%)
1e-11
1e-13
1e-15
1e-18
1e-21
1e-25
1e-30
1e-35
1e-41
1e-48
1e-56
1e-66
1e-77
1e-91
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

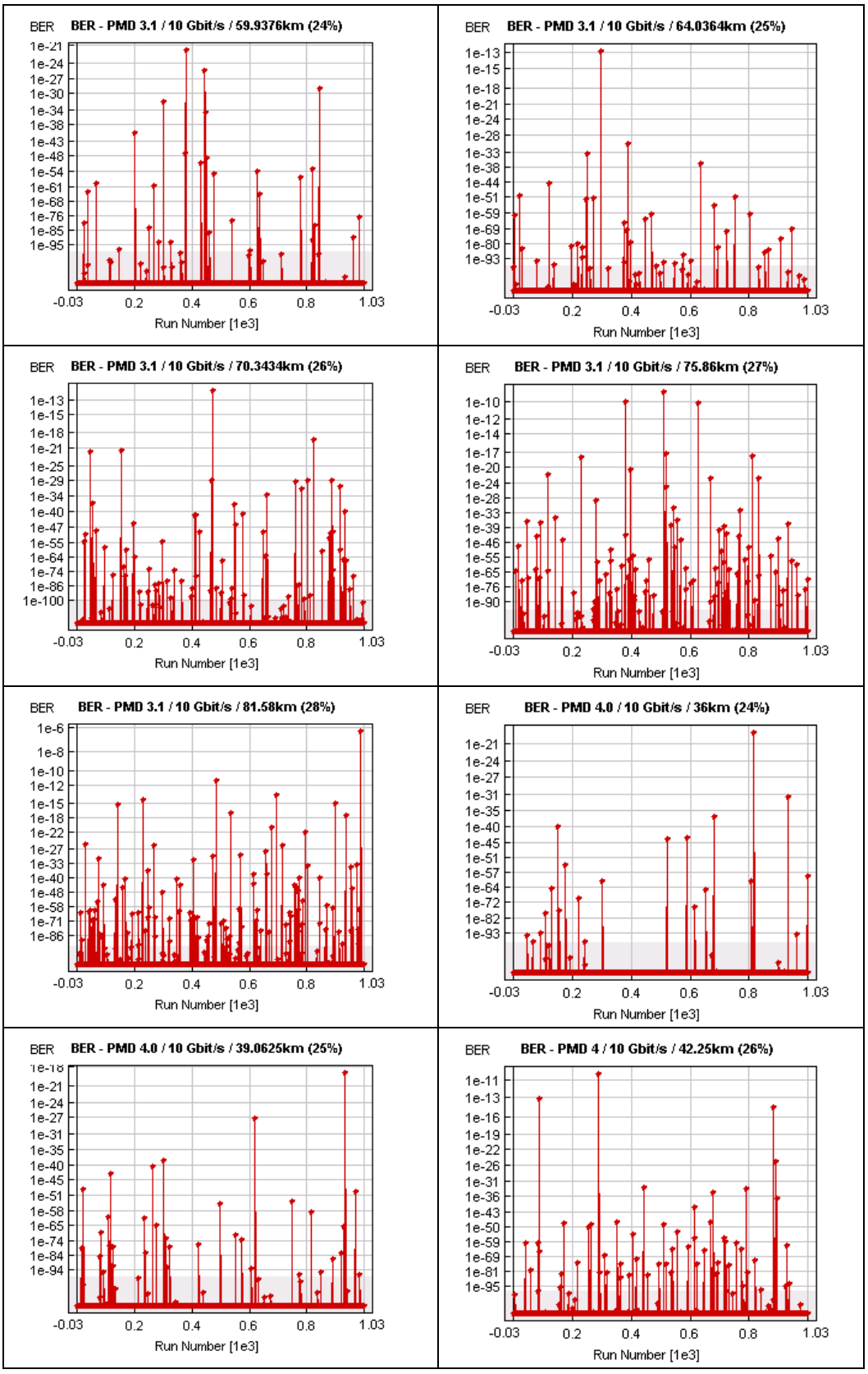
Tabela 5.4 - *Taxa de erro de bit medida para 10Gb/s.*

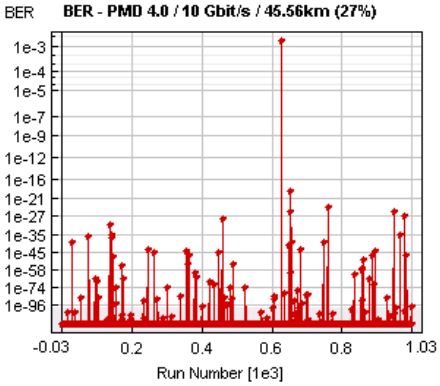
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)				
D_{PMD}	24%	25%	26%	27%	28%
0,2	10^{-20} (2)	**10^{-7}** (1)	10^{-9} (2)	10^{-7} (1)	10^{-9} (1)
0,5	10^{-20} (2)	10^{-11} (2)	10^{-14} (3)	**10^{-9}** (2)	10^{-8} (3)
1,0	10^{-27} (1)	10^{-19} (2)	10^{-10} (4)	**10^{-9}** (2)	10^{-8} (3)
2,0	10^{-18} (2)	10^{-13} (2)	**10^{-7}** (1)	10^{-7} (1)	10^{-6} (1)
3,1	10^{-21} (2)	10^{-13} (2)	10^{-12} (3)	**10^{-9}** (3)	10^{-6} (2)
4,0	10^{-19} (1)	10^{-18} (1)	10^{-10} (2)	**10^{-3}** (1)	10^{-6} (1)
8,0	10^{-27} (1)	10^{-32} (1)	10^{-22} (1)	10^{-15} (2)	**10^{-9}** (1)

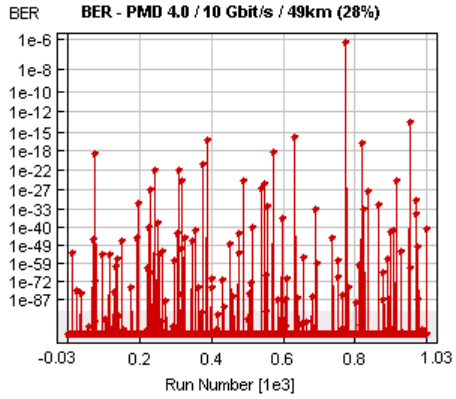


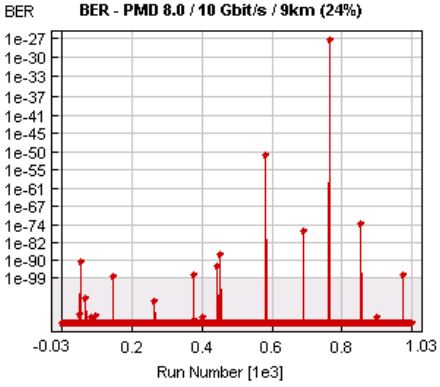

BER
BER - PMD 0.2 / 10 Gbit/s / 19600km (28%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-29
1e-34
1e-40
1e-48
1e-57
1e-67
1e-80
1e-94
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.5 / 10 Gbit/s / 2304km (24%)
1e-23
1e-26
1e-29
1e-33
1e-37
1e-41
1e-46
1e-52
1e-58
1e-65
1e-73
1e-82
1e-92
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.5 / 10 Gbit/s / 2500km (25%)
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-31
1e-36
1e-43
1e-50
1e-59
1e-69
1e-81
1e-95
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.5 / 10 Gbit/s / 2704km (26%)
1e-15
1e-18
1e-21
1e-24
1e-28
1e-32
1e-37
1e-43
1e-49
1e-56
1e-65
1e-75
1e-86
1e-98
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.5/ 10 Gbit/s / 2916km (27%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-29
1e-34
1e-40
1e-47
1e-56
1e-66
1e-78
1e-92
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.5 / 10 Gbit/s / 3136km (28%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-27
1e-32
1e-38
1e-46
1e-55
1e-66
1e-78
1e-93
-7
50
100
150
200
248
Run Number
BER
BER - PMD 1.0 / 10 Gbit/s / 841km (24%)
1e-28
1e-31
1e-34
1e-38
1e-42
1e-46
1e-51
1e-56
1e-62
1e-69
1e-76
1e-84
1e-93
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 1 / 10 Gbit/s / 625km (25%)
1e-19
1e-22
1e-25
1e-29
1e-33
1e-37
1e-42
1e-47
1e-53
1e-60
1e-68
1e-77
1e-87
1e-99
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

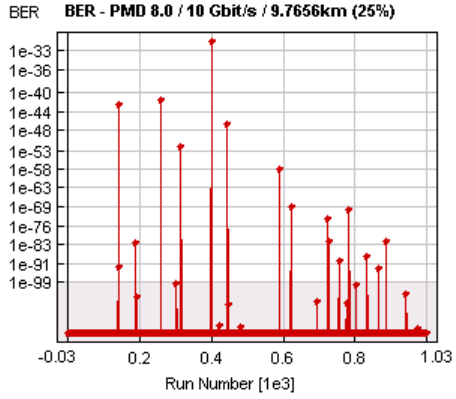

BER
BER - PMD 1.0 / 10 Gbit/s / 676km (26%)
1e-11
1e-13
1e-15
1e-18
1e-21
1e-25
1e-30
1e-35
1e-41
1e-48
1e-56
1e-66
1e-77
1e-91
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 1.0 / 10 Gbit/s / 729km (27%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-15
1e-18
1e-21
1e-25
1e-30
1e-36
1e-42
1e-50
1e-59
1e-69
1e-81
1e-96
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 1.0 / 10 Gbit/s / 784km (28%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-26
1e-31
1e-37
1e-44
1e-52
1e-62
1e-73
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 10 Gbit/s / 144km (24%)
1e-18
1e-21
1e-24
1e-27
1e-31
1e-35
1e-40
1e-46
1e-52
1e-59
1e-67
1e-76
1e-86
1e-97
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2.0 / 10 Gbit/s / 156.25km (25%)
1e-13
1e-15
1e-18
1e-21
1e-24
1e-28
1e-32
1e-37
1e-43
1e-50
1e-58
1e-67
1e-78
1e-90
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2.0 / 10 Gbit/s / 169km (26%)
1e-7
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-34
1e-41
1e-49
1e-59
1e-70
1e-84
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2.0 / 10 Gbit/s / 182.25km (27%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-48
1e-58
1e-70
1e-84
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2.0 / 10 Gbit/s / 196km (28%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-49
1e-60
1e-72
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

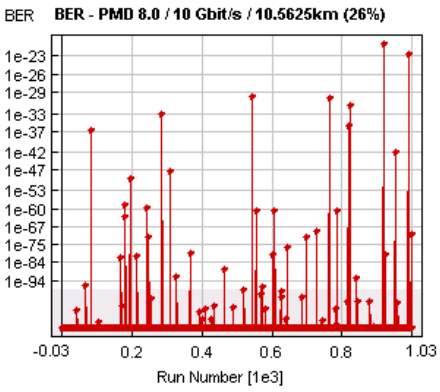

BER
BER - PMD 3.1 / 10 Gbit/s / 59.9376km (24%)
1e-21
1e-24
1e-27
1e-30
1e-34
1e-38
1e-43
1e-48
1e-54
1e-61
1e-68
1e-76
1e-85
1e-95
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 10 Gbit/s / 64.0364km (25%)
1e-13
1e-15
1e-18
1e-21
1e-24
1e-28
1e-33
1e-38
1e-44
1e-51
1e-59
1e-69
1e-80
1e-93
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 10 Gbit/s / 70.3434km (26%)
1e-13
1e-15
1e-18
1e-21
1e-25
1e-29
1e-34
1e-40
1e-47
1e-55
1e-64
1e-74
1e-86
1e-100
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 10 Gbit/s / 75.86km (27%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-55
1e-65
1e-76
1e-90
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 10 Gbit/s / 81.58km (28%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-48
1e-58
1e-71
1e-86
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4.0 / 10 Gbit/s / 36km (24%)
1e-21
1e-24
1e-27
1e-31
1e-35
1e-40
1e-45
1e-51
1e-57
1e-64
1e-72
1e-82
1e-93
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4.0 / 10 Gbit/s / 39.0625km (25%)
1e-21
1e-24
1e-27
1e-31
1e-35
1e-40
1e-45
1e-51
1e-58
1e-65
1e-74
1e-84
1e-94
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 10 Gbit/s / 42.25km (26%)
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-31
1e-36
1e-43
1e-50
1e-59
1e-69
1e-81
1e-95
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

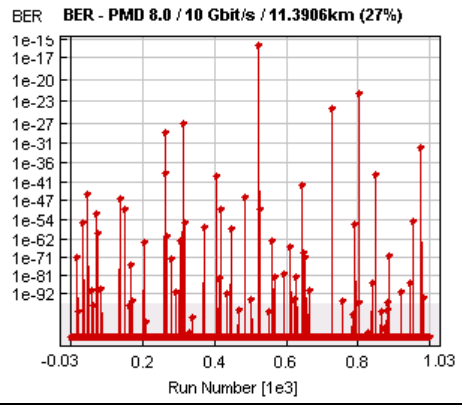

BER
BER - PMD 4.0 / 10 Gbit/s / 45.56km (27%)
1e-3
1e-4
1e-5
1e-7
1e-9
1e-12
1e-16
1e-21
1e-27
1e-35
1e-45
1e-58
1e-74
1e-96
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 4.0 / 10 Gbit/s / 49km (28%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-49
1e-59
1e-72
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 8.0 / 10 Gbit/s / 9km (24%)
1e-27
1e-30
1e-33
1e-37
1e-41
1e-45
1e-50
1e-55
1e-61
1e-67
1e-74
1e-82
1e-90
1e-99
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 8.0 / 10 Gbit/s / 9.7656km (25%)
1e-33
1e-36
1e-40
1e-44
1e-48
1e-53
1e-58
1e-63
1e-69
1e-76
1e-83
1e-91
1e-99
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 8.0 / 10 Gbit/s / 10.5625km (26%)
1e-23
1e-26
1e-29
1e-33
1e-37
1e-42
1e-47
1e-53
1e-60
1e-67
1e-75
1e-84
1e-94
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 8.0 / 10 Gbit/s / 11.3906km (27%)
1e-15
1e-17
1e-20
1e-23
1e-27
1e-31
1e-36
1e-41
1e-47
1e-54
1e-62
1e-71
1e-81
1e-92
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

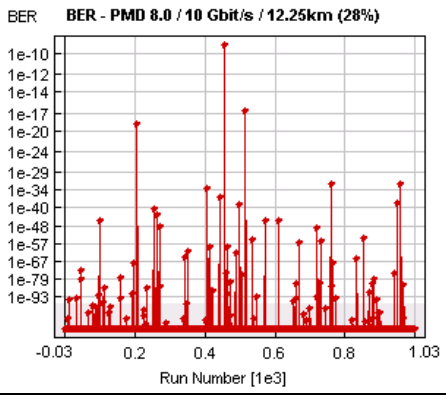
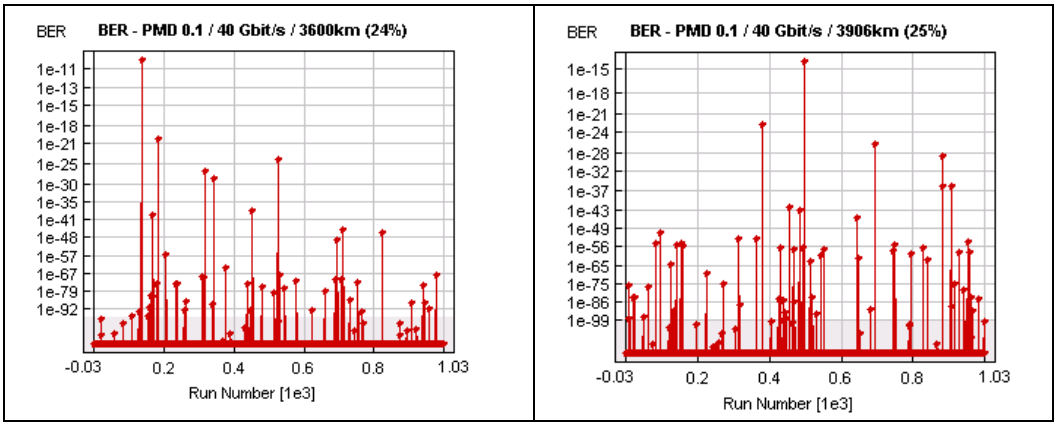
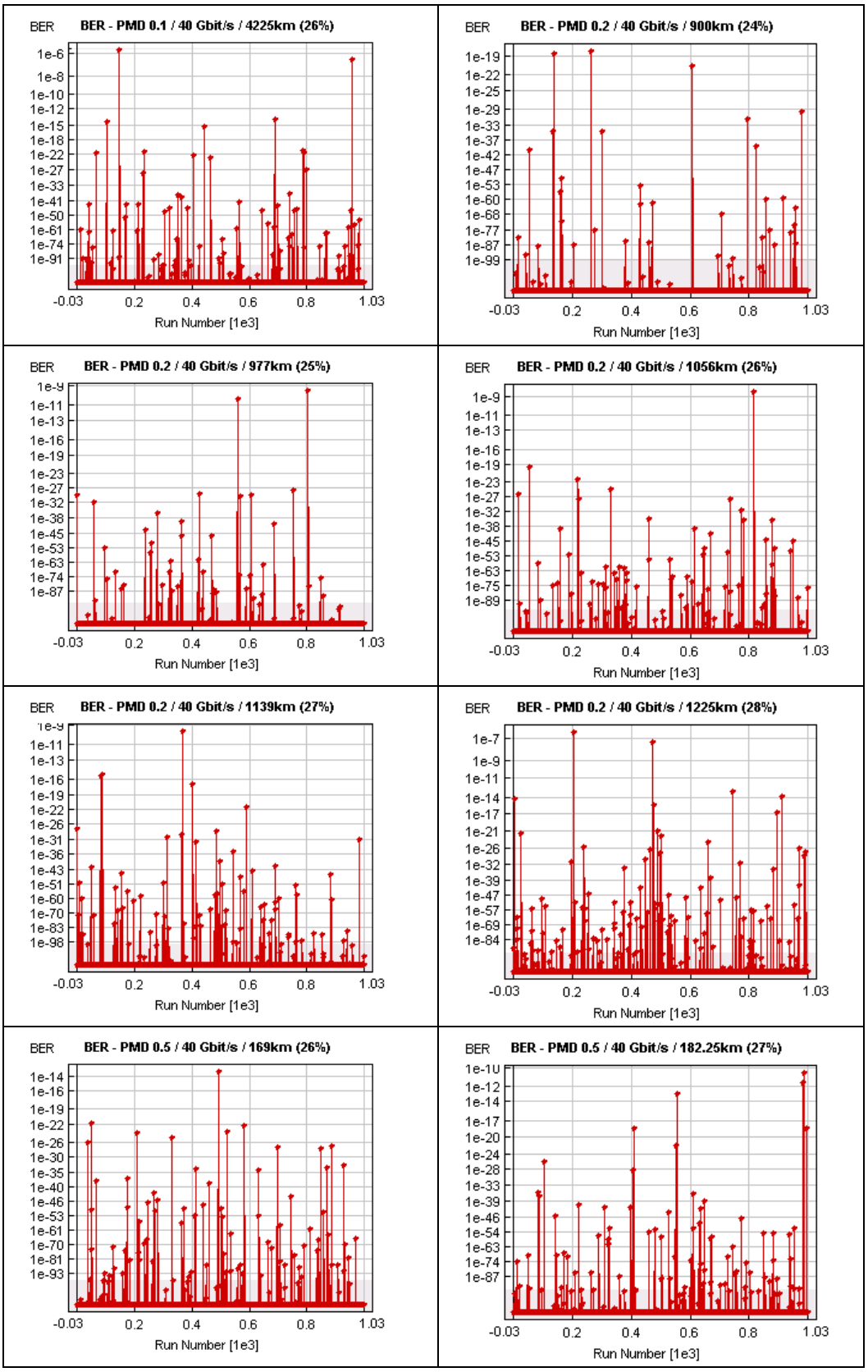
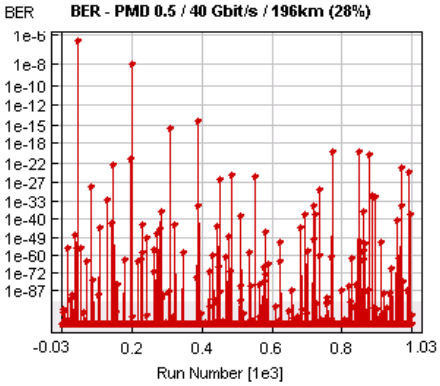

BER
BER - PMD 8.0 / 10 Gbit/s / 12.25km (28%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-29
1e-34
1e-40
1e-48
1e-57
1e-67
1e-79
1e-93
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

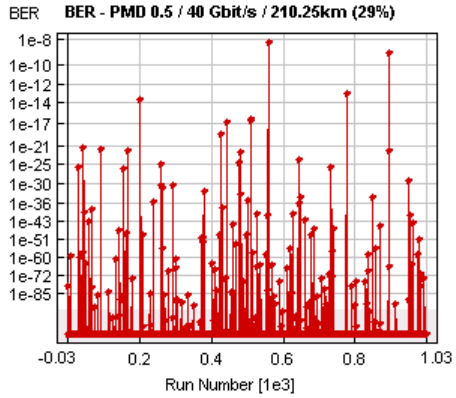
Tabela 5.6 - *Taxa de erro de bit medida para 40Gb/s.*

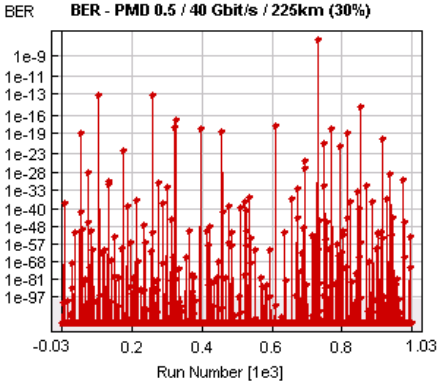
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (Tb)						
D_{PMD}	24%	25%	26%	27%	28%	29%	30%
0,1	10^{-10} (1)	10^{-14} (3)	**10^{-6}** (1)				
0,2	10^{-18} (2)	**10^{-9}** (2)	10^{-9} (2)	10^{-9} (2)	10^{-7} (2)		
0,5			10^{-14} (4)	10^{-10} (4)	**10^{-6}** (3)	10^{-8} (2)	10^{-8} (2)
1,0			10^{-11} (2)	10^{-10} (2)	**10^{-8}** (2)	10^{-7} (1)	10^{-5} (1)
2,0			10^{-18} (1)	10^{-16} (3)	**10^{-8}** (4)	10^{-10} (3)	10^{-7} (1)
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	28%	29%	30%	31%	32%	33%	34%
3,1	10^{-57} (1)	10^{-21} (1)	10^{-24} (1)	10^{-12} (1)	10^{-10} (2)	**10^{-8}** (1)	10^{-9} (2)
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	32%	33%	34%	35%	36%	37%	38%
4,0	10^{-40} (1)	10^{-22} (1)	10^{-17} (1)	10^{-12} (1)	10^{-13} (2)	**10^{-8}** (1)	10^{-7} (1)
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	50%	51%	52%	53%	54%	55%	56%
8,0	10^{-20} (1)	10^{-18} (1)	10^{-14} (1)	10^{-12} (1)	10^{-10} (2)	**10^{-9}** (2)	10^{-5} (1)

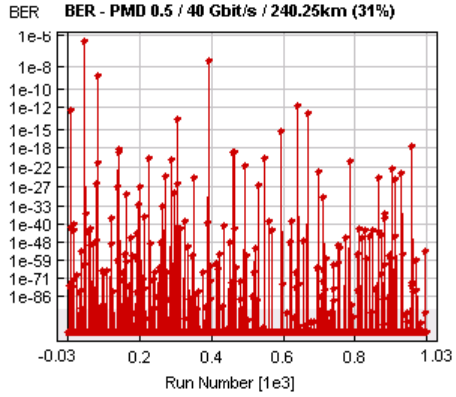


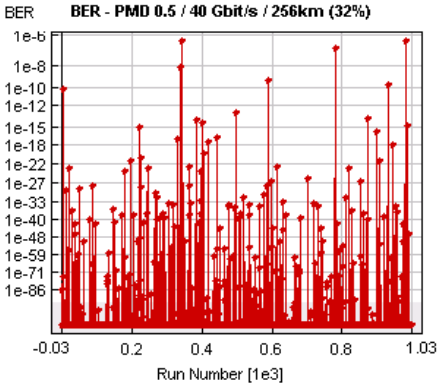

BER
BER - PMD 0.1 / 40 Gbit/s / 4225km (26%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-41
1e-50
1e-61
1e-74
1e-91
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.2 / 40 Gbit/s / 900km (24%)
1e-19
1e-22
1e-25
1e-29
1e-33
1e-37
1e-42
1e-47
1e-53
1e-60
1e-68
1e-77
1e-87
1e-99
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.2 / 40 Gbit/s / 977km (25%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-27
1e-32
1e-38
1e-45
1e-53
1e-63
1e-74
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.2 / 40 Gbit/s / 1056km (26%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-27
1e-32
1e-38
1e-45
1e-53
1e-63
1e-75
1e-89
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.2 / 40 Gbit/s / 1139km (27%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-31
1e-36
1e-43
1e-51
1e-60
1e-70
1e-83
1e-98
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.2 / 40 Gbit/s / 1225km (28%)
1e-7
1e-9
1e-11
1e-14
1e-17
1e-21
1e-26
1e-32
1e-39
1e-47
1e-57
1e-69
1e-84
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.5 / 40 Gbit/s / 169km (26%)
1e-14
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-30
1e-35
1e-40
1e-46
1e-53
1e-61
1e-70
1e-81
1e-93
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 0.5 / 40 Gbit/s / 182.25km (27%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-54
1e-63
1e-74
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

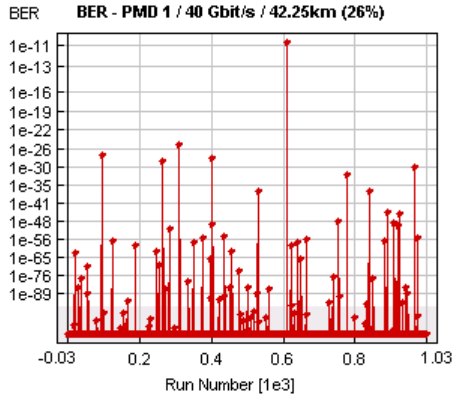

BER
BER - PMD 0.5 / 40 Gbit/s / 196km (28%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-49
1e-60
1e-72
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

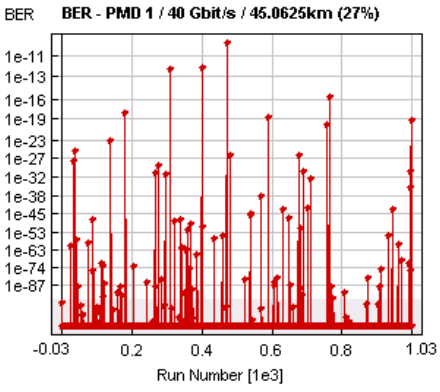

BER
BER - PMD 0.5 / 40 Gbit/s / 210.25km (29%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-21
1e-25
1e-30
1e-36
1e-43
1e-51
1e-60
1e-72
1e-85
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

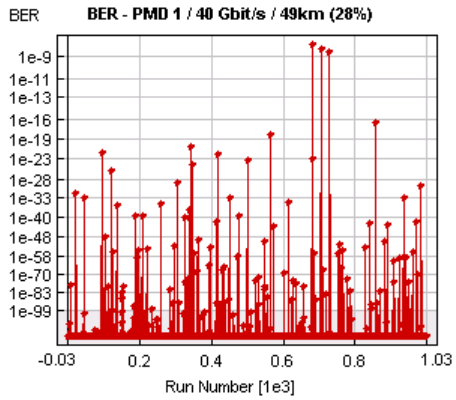

BER
BER - PMD 0.5 / 40 Gbit/s / 225km (30%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-33
1e-40
1e-48
1e-57
1e-68
1e-81
1e-97
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

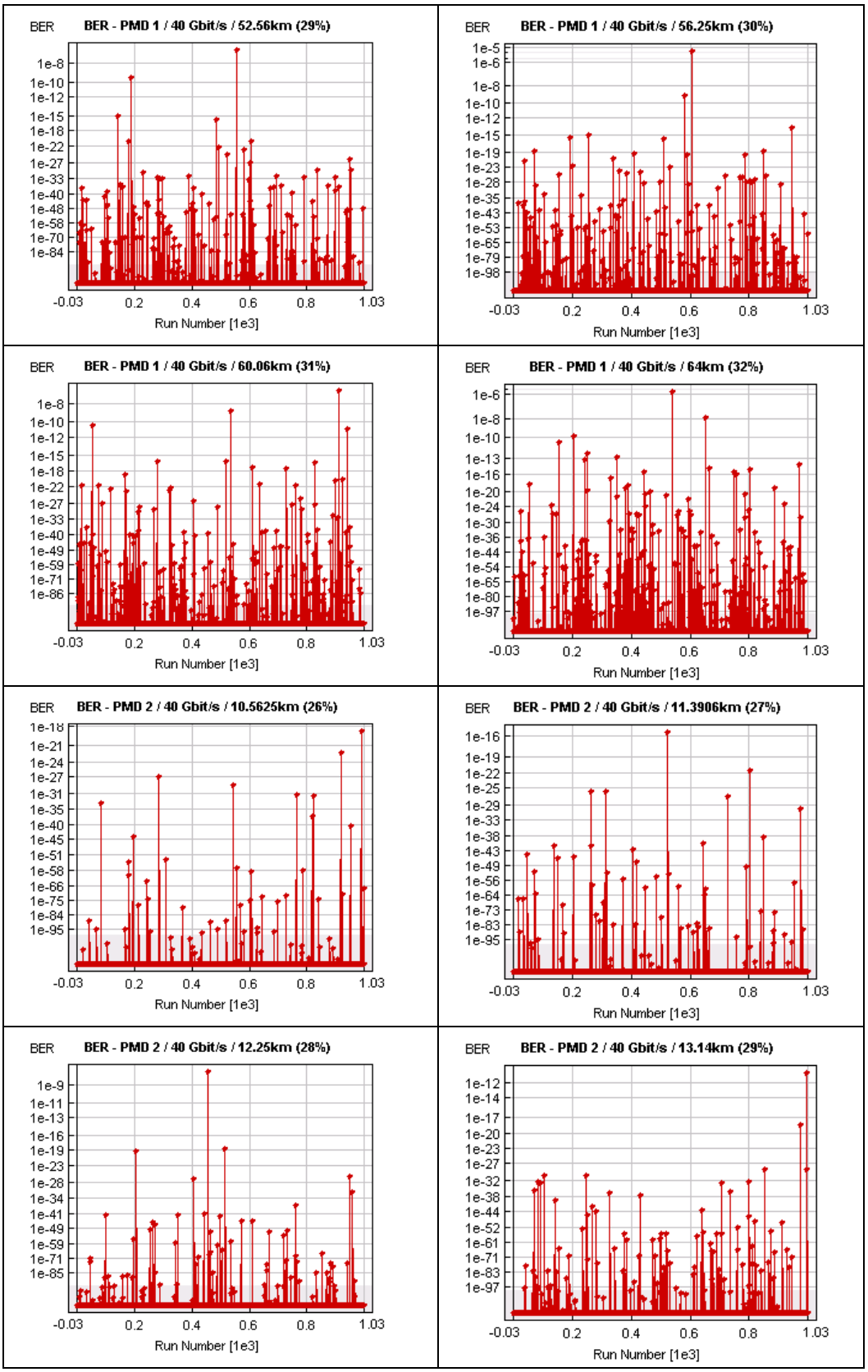

BER
BER - PMD 0.5 / 40 Gbit/s / 240.25km (31%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-48
1e-59
1e-71
1e-86
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

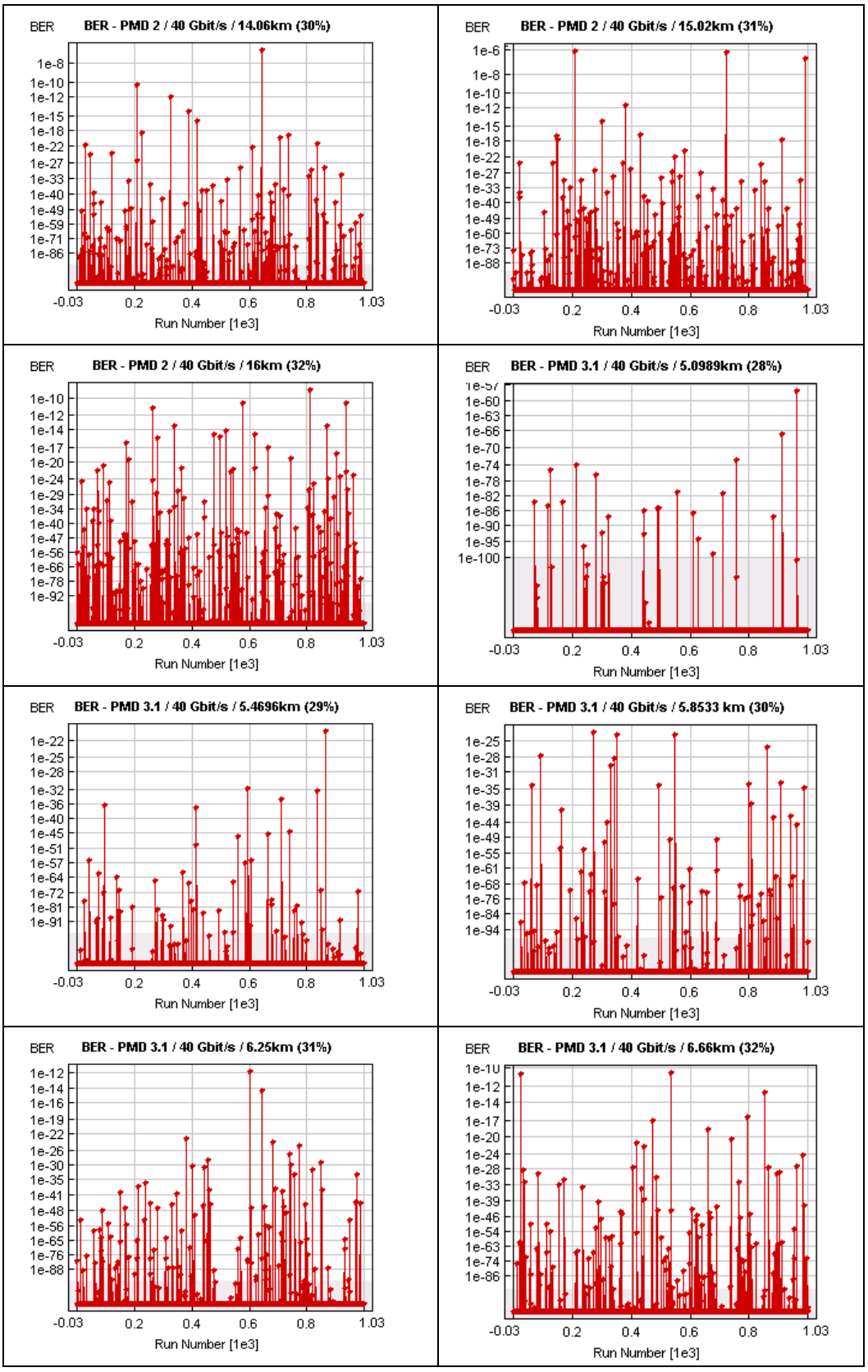

BER
BER - PMD 0.5 / 40 Gbit/s / 256km (32%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-48
1e-59
1e-71
1e-86
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

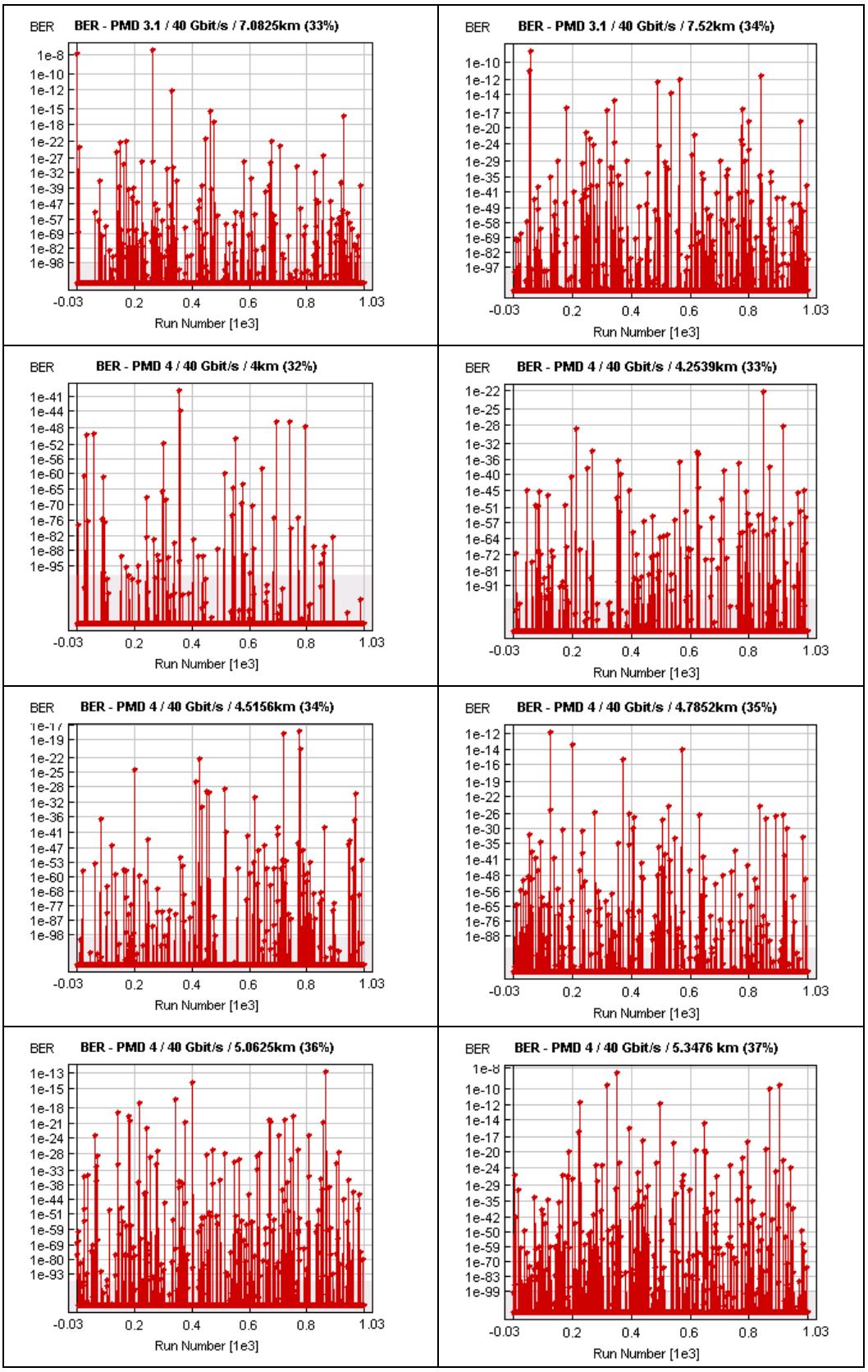

BER
BER - PMD 1 / 40 Gbit/s / 42.25km (26%)
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-30
1e-35
1e-41
1e-48
1e-56
1e-65
1e-76
1e-89
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

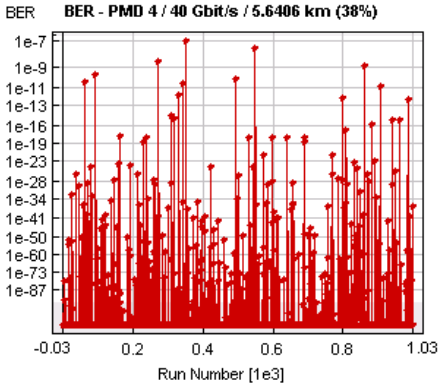

BER
BER - PMD 1 / 40 Gbit/s / 45.0625km (27%)
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-27
1e-32
1e-38
1e-45
1e-53
1e-63
1e-74
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

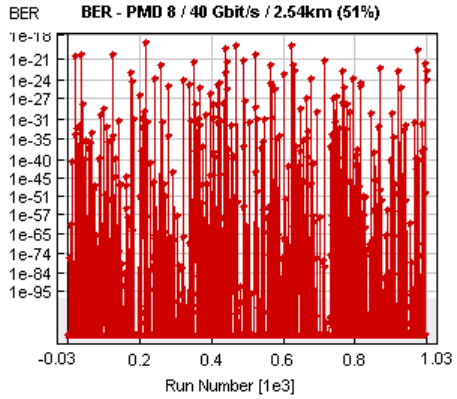

BER
BER - PMD 1 / 40 Gbit/s / 49km (28%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-33
1e-40
1e-48
1e-58
1e-70
1e-83
1e-99
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

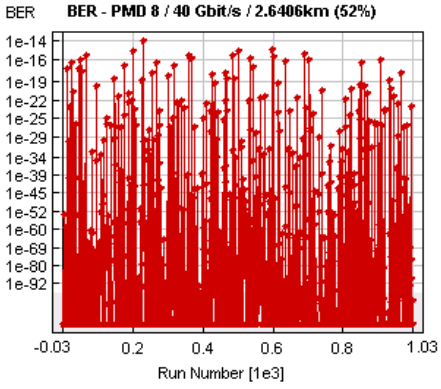

BER
BER - PMD 1 / 40 Gbit/s / 52.56km (29%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-48
1e-58
1e-70
1e-84
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 1 / 40 Gbit/s / 56.25km (30%)
1e-5
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-19
1e-23
1e-28
1e-35
1e-43
1e-53
1e-65
1e-79
1e-98
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 1 / 40 Gbit/s / 60.06km (31%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-49
1e-59
1e-71
1e-86
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 1 / 40 Gbit/s / 64km (32%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-13
1e-16
1e-20
1e-24
1e-30
1e-36
1e-44
1e-54
1e-65
1e-80
1e-97
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 40 Gbit/s / 10.5625km (26%)
1e-18
1e-21
1e-24
1e-27
1e-31
1e-35
1e-40
1e-45
1e-51
1e-58
1e-66
1e-75
1e-84
1e-95
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 40 Gbit/s / 11.3906km (27%)
1e-16
1e-19
1e-22
1e-25
1e-29
1e-33
1e-38
1e-43
1e-49
1e-56
1e-64
1e-73
1e-83
1e-95
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 40 Gbit/s / 12.25km (28%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-34
1e-41
1e-49
1e-59
1e-71
1e-85
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 40 Gbit/s / 13.14km (29%)
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-23
1e-27
1e-32
1e-38
1e-44
1e-52
1e-61
1e-71
1e-83
1e-97
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

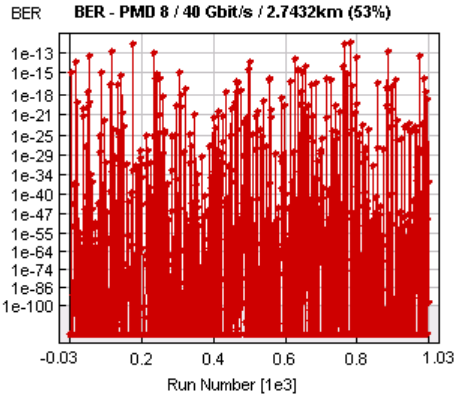

BER
BER - PMD 2 / 40 Gbit/s / 14.06km (30%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-49
1e-59
1e-71
1e-86
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 40 Gbit/s / 15.02km (31%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-49
1e-60
1e-73
1e-88
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 40 Gbit/s / 16km (32%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-29
1e-34
1e-40
1e-47
1e-56
1e-66
1e-78
1e-92
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 40 Gbit/s / 5.0989km (28%)
1e-60
1e-63
1e-66
1e-70
1e-74
1e-78
1e-82
1e-86
1e-90
1e-95
1e-100
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 40 Gbit/s / 5.4696km (29%)
1e-22
1e-25
1e-28
1e-32
1e-36
1e-40
1e-45
1e-51
1e-57
1e-64
1e-72
1e-81
1e-91
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 40 Gbit/s / 5.8533 km (30%)
1e-25
1e-28
1e-31
1e-35
1e-39
1e-44
1e-49
1e-55
1e-61
1e-68
1e-76
1e-84
1e-94
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 40 Gbit/s / 6.25km (31%)
1e-12
1e-14
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-30
1e-35
1e-41
1e-48
1e-56
1e-65
1e-76
1e-88
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 40 Gbit/s / 6.66km (32%)
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-54
1e-63
1e-74
1e-86
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

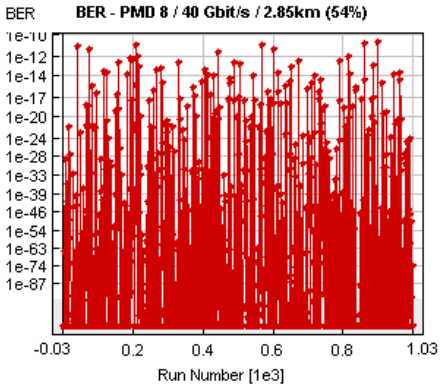

BER
BER - PMD 3.1 / 40 Gbit/s / 7.0825km (33%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-32
1e-39
1e-47
1e-57
1e-69
1e-82
1e-98
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 40 Gbit/s / 7.52km (34%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-29
1e-35
1e-41
1e-49
1e-58
1e-69
1e-82
1e-97
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 40 Gbit/s / 4km (32%)
1e-41
1e-44
1e-48
1e-52
1e-56
1e-60
1e-65
1e-70
1e-76
1e-82
1e-88
1e-95
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 40 Gbit/s / 4.2539km (33%)
1e-22
1e-25
1e-28
1e-32
1e-36
1e-40
1e-45
1e-51
1e-57
1e-64
1e-72
1e-81
1e-91
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 40 Gbit/s / 4.5156km (34%)
1e-19
1e-22
1e-25
1e-28
1e-32
1e-36
1e-41
1e-47
1e-53
1e-60
1e-68
1e-77
1e-87
1e-98
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 40 Gbit/s / 4.7852km (35%)
1e-12
1e-14
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-30
1e-35
1e-41
1e-48
1e-56
1e-65
1e-76
1e-88
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 40 Gbit/s / 5.0625km (36%)
1e-13
1e-15
1e-18
1e-21
1e-24
1e-28
1e-33
1e-38
1e-44
1e-51
1e-59
1e-69
1e-80
1e-93
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 40 Gbit/s / 5.3476 km (37%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-29
1e-35
1e-42
1e-50
1e-59
1e-70
1e-83
1e-99
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

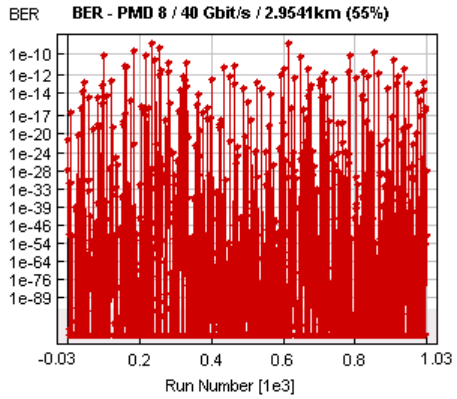

BER
BER - PMD 4 / 40 Gbit/s / 5.6406 km (38%)
1e-7
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-34
1e-41
1e-50
1e-60
1e-73
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 8 / 40 Gbit/s / 2.54km (51%)
1e-21
1e-24
1e-27
1e-31
1e-35
1e-40
1e-45
1e-51
1e-57
1e-65
1e-74
1e-84
1e-95
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 8 / 40 Gbit/s / 2.6406km (52%)
1e-14
1e-16
1e-19
1e-22
1e-25
1e-29
1e-34
1e-39
1e-45
1e-52
1e-60
1e-69
1e-80
1e-92
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 8 / 40 Gbit/s / 2.7432km (53%)
1e-13
1e-15
1e-18
1e-21
1e-25
1e-29
1e-34
1e-40
1e-47
1e-55
1e-64
1e-74
1e-86
1e-100
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 8 / 40 Gbit/s / 2.85km (54%)
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-54
1e-63
1e-74
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 8 / 40 Gbit/s / 2.9541km (55%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-54
1e-64
1e-76
1e-89
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

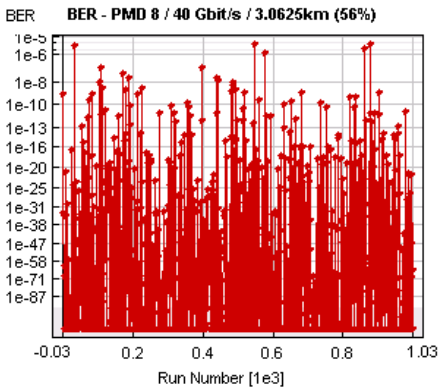
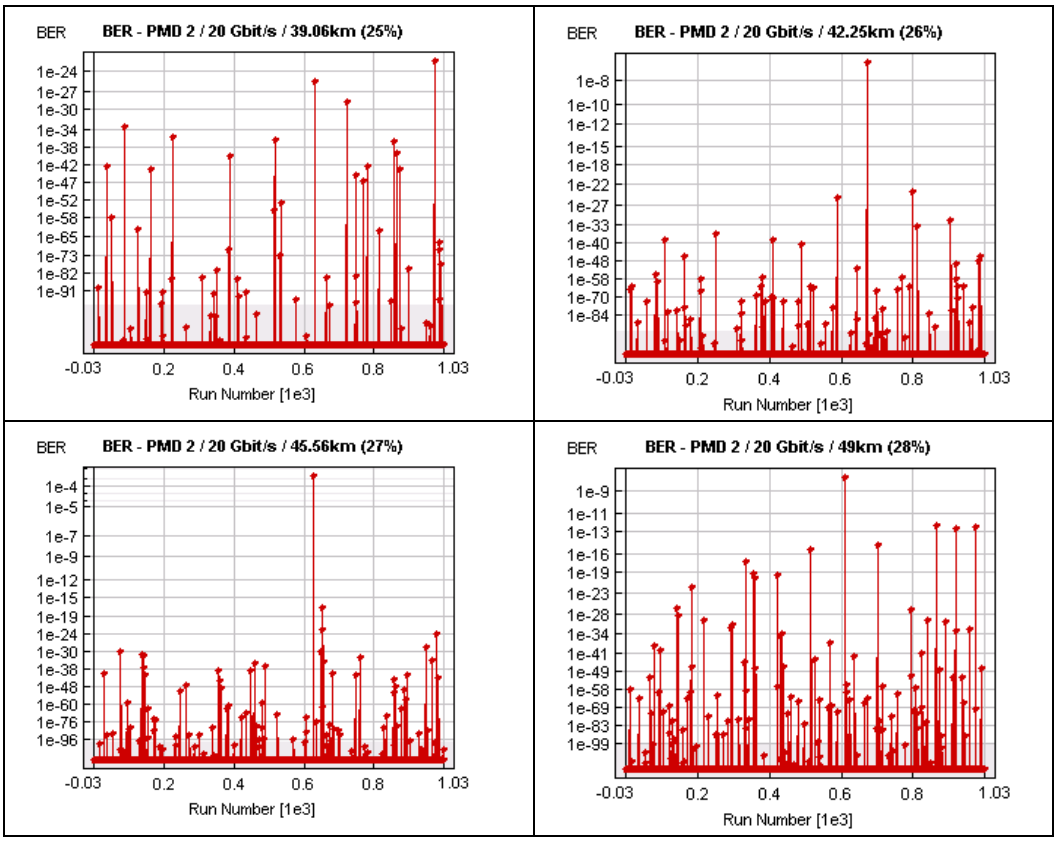
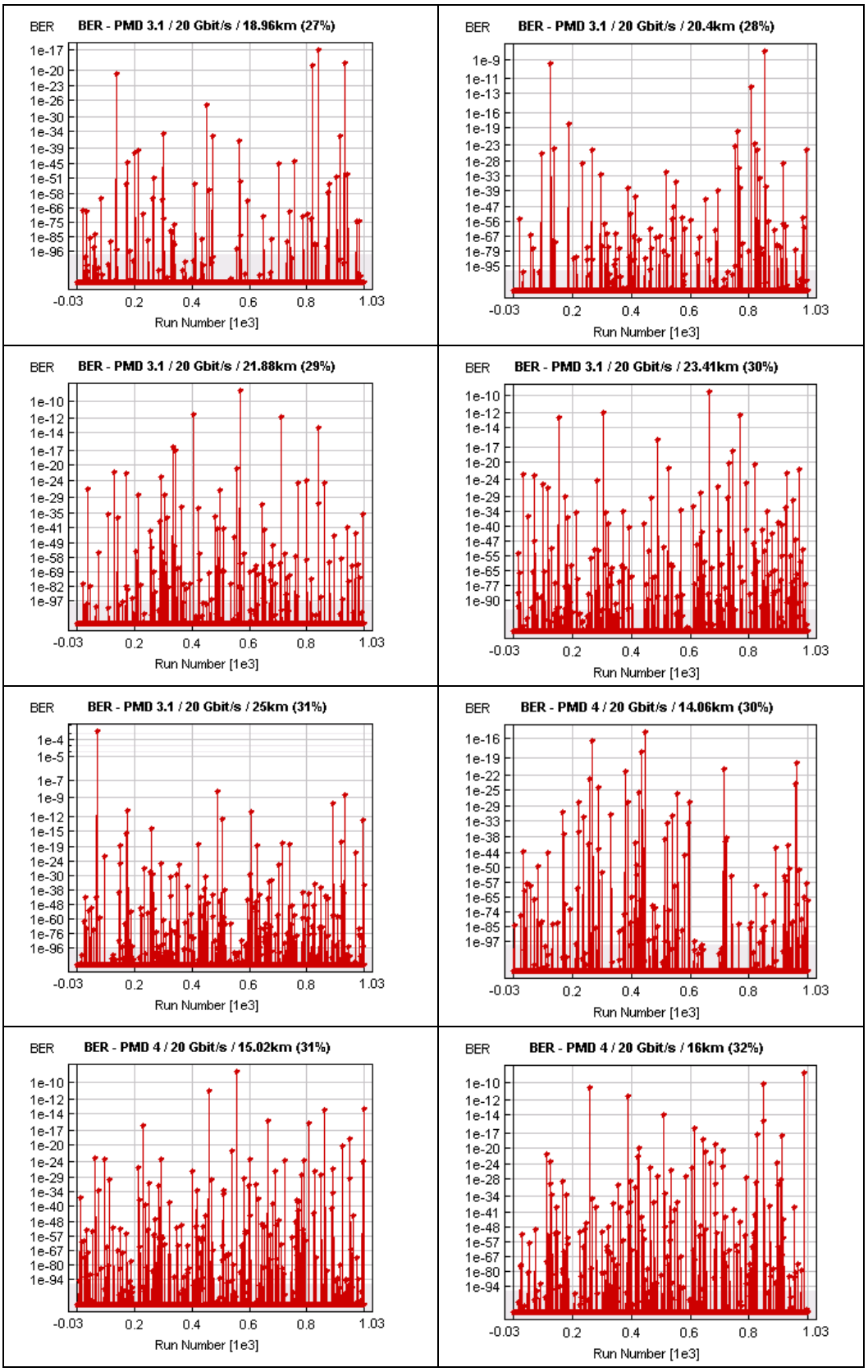

BER
BER - PMD 8 / 40 Gbit/s / 3.0625km (56%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-13
1e-16
1e-20
1e-25
1e-31
1e-38
1e-47
1e-58
1e-71
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

Tabela 5.8 - *Taxa de erro de bit medida para 20Gb/s.*

	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	25%	26%	27%	28%	29%	30%	31%
2,0	10^{-23} (3)	**10^{-7}** (1)	10^{-4} (1)	10^{-8} (1)			
3,1			10^{-17} (2)	**10^{-8}** (1)	10^{-9} (2)	10^{-9} (3)	10^{-4} (1)
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	30%	31%	32%	33%	34%		
4,0	10^{-15} (2)	**10^{-9}** (2)	10^{-9} (2)	10^{-7} (1)	10^{-6} (1)		
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	35%	36%	37%	38%	39%	40%	
8,0	10^{-15} (1)	10^{-10} (3)	**10^{-7}** (1)	10^{-9} (1)	10^{-7} (1)	10^{-4} (1)	




BER
BER - PMD 3.1 / 20 Gbit/s / 18.96km (27%)
1e-17
1e-20
1e-23
1e-26
1e-30
1e-34
1e-39
1e-45
1e-51
1e-58
1e-66
1e-75
1e-85
1e-96
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 20 Gbit/s / 20.4km (28%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-33
1e-39
1e-47
1e-56
1e-67
1e-79
1e-95
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 20 Gbit/s / 21.88km (29%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-29
1e-35
1e-41
1e-49
1e-58
1e-69
1e-82
1e-97
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 20 Gbit/s / 23.41km (30%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-29
1e-34
1e-40
1e-47
1e-55
1e-65
1e-77
1e-90
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 20 Gbit/s / 25km (31%)
1e-4
1e-5
1e-7
1e-9
1e-12
1e-15
1e-19
1e-24
1e-30
1e-38
1e-48
1e-60
1e-76
1e-96
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 20 Gbit/s / 14.06km (30%)
1e-16
1e-19
1e-22
1e-25
1e-29
1e-33
1e-38
1e-44
1e-50
1e-57
1e-65
1e-74
1e-85
1e-97
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 20 Gbit/s / 15.02km (31%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-29
1e-34
1e-40
1e-48
1e-57
1e-67
1e-80
1e-94
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 20 Gbit/s / 16km (32%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-34
1e-41
1e-48
1e-57
1e-67
1e-80
1e-94
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

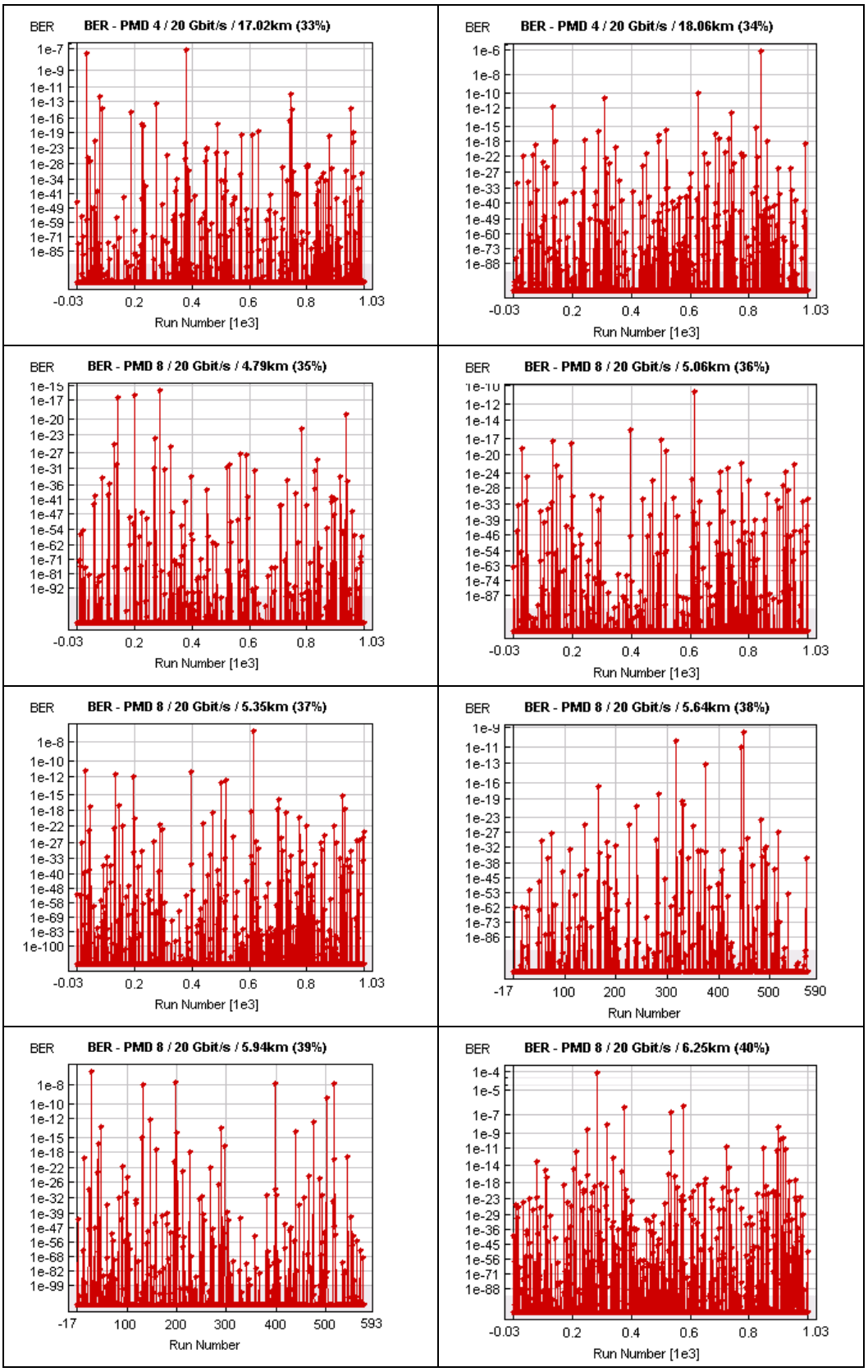
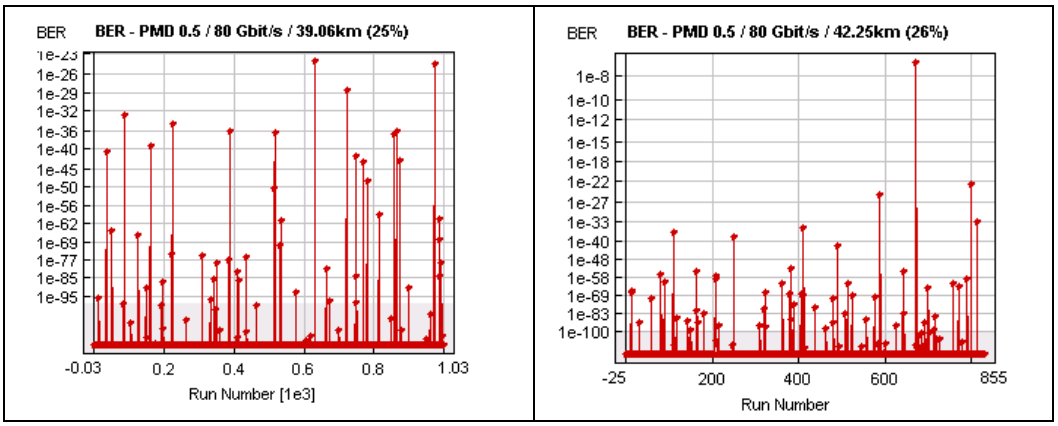
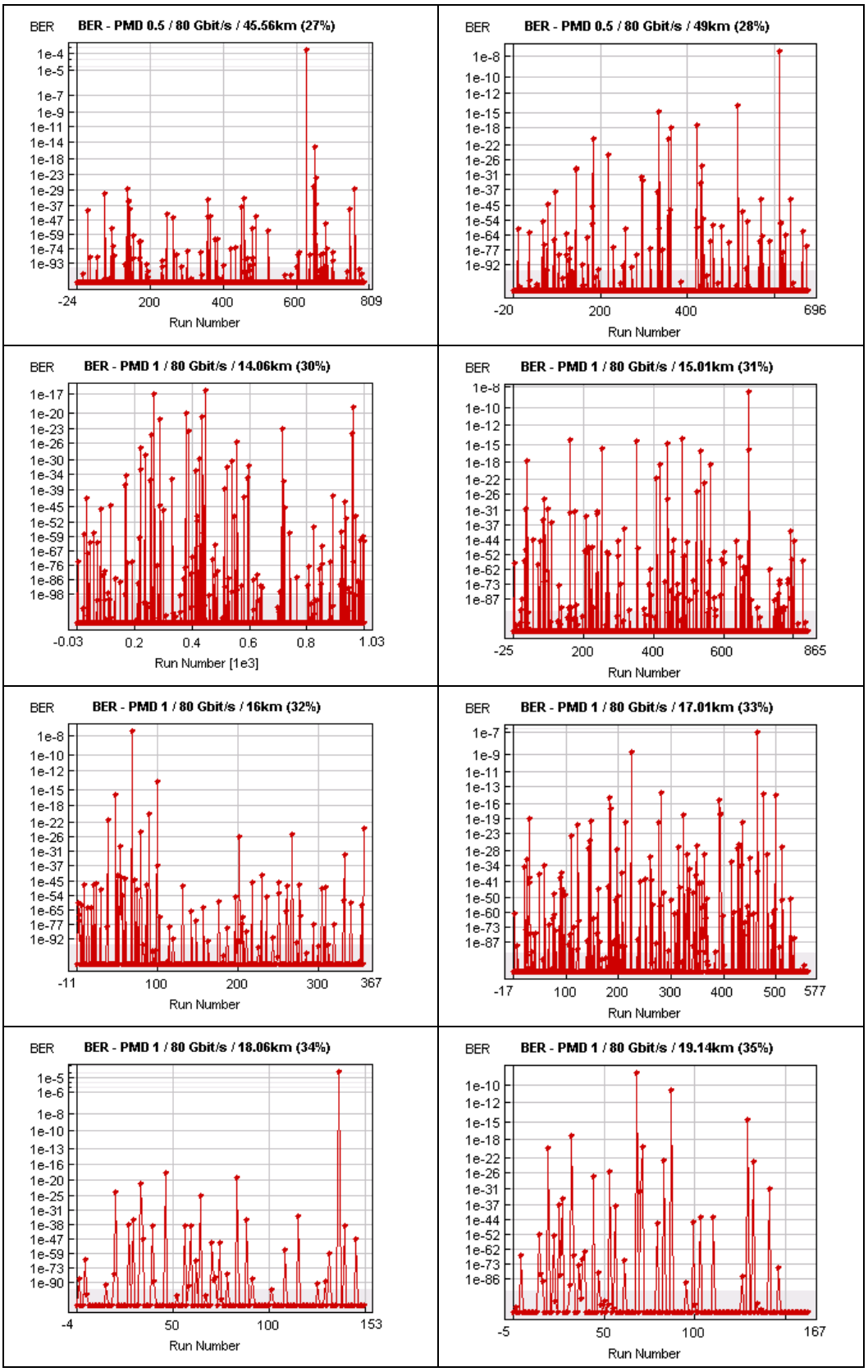
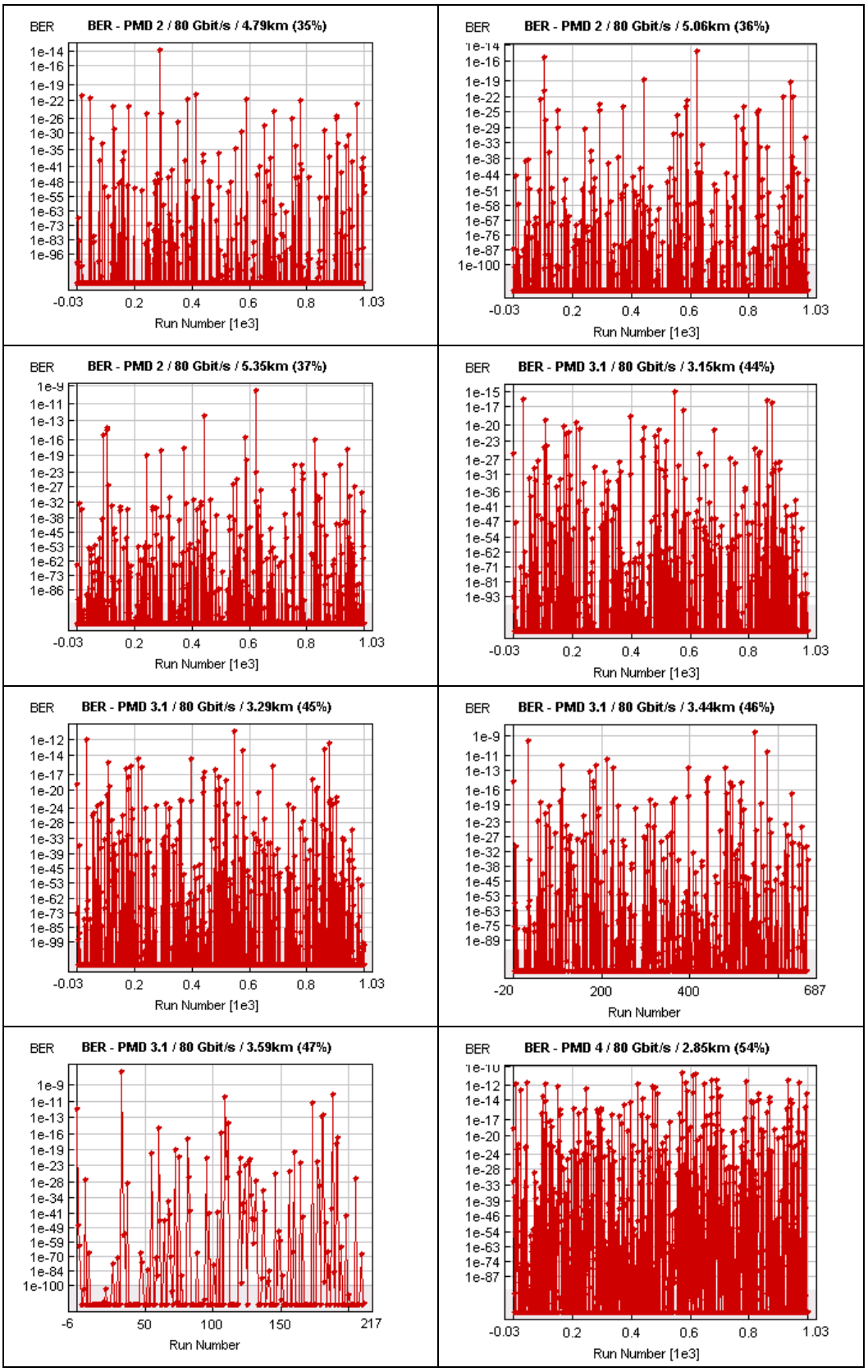

BER
BER - PMD 4 / 20 Gbit/s / 17.02km (33%)
1e-7
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-34
1e-41
1e-49
1e-59
1e-71
1e-85
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 4 / 20 Gbit/s / 18.06km (34%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-49
1e-60
1e-73
1e-88
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 8 / 20 Gbit/s / 4.79km (35%)
1e-15
1e-17
1e-20
1e-23
1e-27
1e-31
1e-36
1e-41
1e-47
1e-54
1e-62
1e-71
1e-81
1e-92
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 8 / 20 Gbit/s / 5.06km (36%)
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-54
1e-63
1e-74
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 8 / 20 Gbit/s / 5.35km (37%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-27
1e-33
1e-40
1e-48
1e-58
1e-69
1e-83
1e-100
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 8 / 20 Gbit/s / 5.64km (38%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-27
1e-32
1e-38
1e-45
1e-53
1e-62
1e-73
1e-86
-17
100
200
300
400
500
590
Run Number
BER
BER - PMD 8 / 20 Gbit/s / 5.94km (39%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-26
1e-32
1e-39
1e-47
1e-56
1e-68
1e-82
1e-99
-17
100
200
300
400
500
593
Run Number
BER
BER - PMD 8 / 20 Gbit/s / 6.25km (40%)
1e-4
1e-5
1e-7
1e-9
1e-11
1e-14
1e-18
1e-23
1e-29
1e-36
1e-45
1e-56
1e-71
1e-88
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]

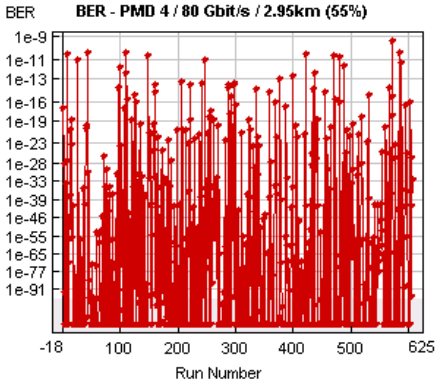
Tabela 5.10 – *Taxa de erro de bit medida para 80Gb/s.*

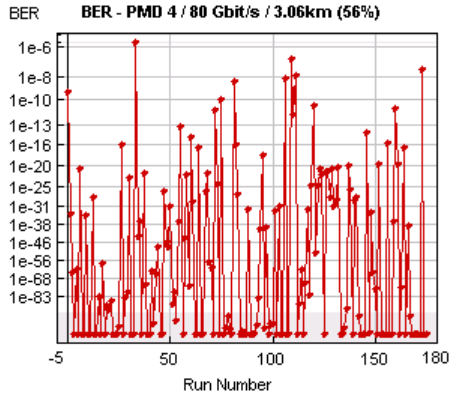
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	24%	25%	26%	27%	28%	29%	30%
0,5		10^{-23} (1)	**10^{-7}** (1)	10^{-4} (1)	10^{-8} (1)		
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	29%	30%	31%	32%	33%	34%	35%
1,0		10^{-17} (1)	**10^{-8}** (2)	10^{-8} (1)	10^{-7} (2)	10^{-5} (2)	10^{-9} (1)
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	32%	33%	34%	35%	36%	37%	38%
2,0				10^{-14} (1)	10^{-14} (1)	**10^{-9}** (1)	
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	42%	43%	44%	45%	46%	47%	48%
3,1			10^{-15} (1)	10^{-11} (1)	**10^{-9}** (1)	10^{-8} (1)	
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	52%	53%	54%	55%	56%	57%	58%
4,0			10^{-10} (1)	**10^{-9}** (1)	10^{-6} (1)		
	Percentual de dispersão utilizado em relação ao tempo de bit (T_b)						
D_{PMD}	85%	86%	87%	88%	89%	90%	91%
8,0				10^{-10} (1)	**10^{-9}** (1)	10^{-8} (1)	

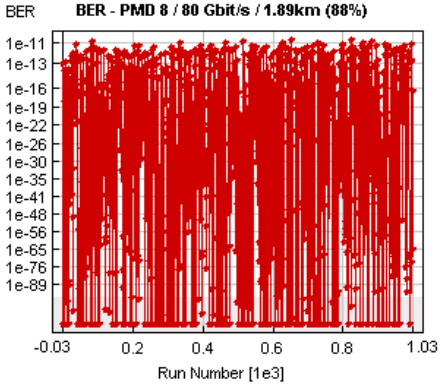


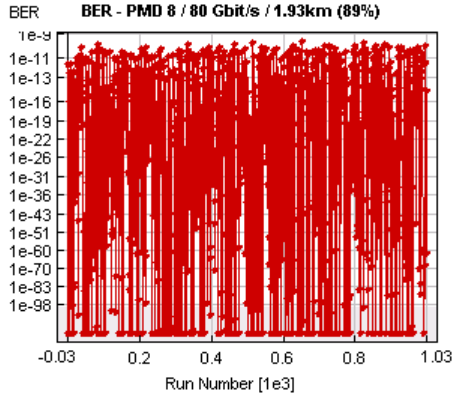

BER
BER - PMD 0.5 / 80 Gbit/s / 45.56km (27%)
1e-4
1e-5
1e-7
1e-9
1e-11
1e-14
1e-18
1e-23
1e-29
1e-37
1e-47
1e-59
1e-74
1e-93
-24
200
400
600
809
Run Number
BER
BER - PMD 0.5 / 80 Gbit/s / 49km (28%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-26
1e-31
1e-37
1e-45
1e-54
1e-64
1e-77
1e-92
-20
200
400
696
Run Number
BER
BER - PMD 1 / 80 Gbit/s / 14.06km (30%)
1e-17
1e-20
1e-23
1e-26
1e-30
1e-34
1e-39
1e-45
1e-52
1e-59
1e-67
1e-76
1e-86
1e-98
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 1 / 80 Gbit/s / 15.01km (31%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-26
1e-31
1e-37
1e-44
1e-52
1e-62
1e-73
1e-87
-25
200
400
600
865
Run Number
BER
BER - PMD 1 / 80 Gbit/s / 16km (32%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-26
1e-31
1e-37
1e-45
1e-54
1e-65
1e-77
1e-92
-11
100
200
300
367
Run Number
BER
BER - PMD 1 / 80 Gbit/s / 17.01km (33%)
1e-7
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-34
1e-41
1e-50
1e-60
1e-73
1e-87
-17
100
200
300
400
500
577
Run Number
BER
BER - PMD 1 / 80 Gbit/s / 18.06km (34%)
1e-5
1e-6
1e-8
1e-10
1e-13
1e-16
1e-20
1e-25
1e-31
1e-38
1e-47
1e-59
1e-73
1e-90
-4
50
100
153
Run Number
BER
BER - PMD 1 / 80 Gbit/s / 19.14km (35%)
1e-10
1e-12
1e-15
1e-18
1e-22
1e-26
1e-31
1e-37
1e-44
1e-52
1e-62
1e-73
1e-86
-5
50
100
167
Run Number

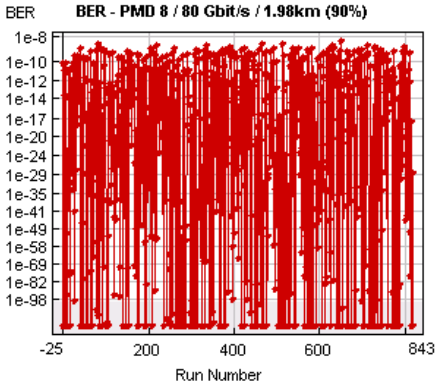

BER
BER - PMD 2 / 80 Gbit/s / 4.79km (35%)
1e-14
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-30
1e-35
1e-41
1e-48
1e-55
1e-63
1e-73
1e-83
1e-96
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 80 Gbit/s / 5.06km (36%)
1e-16
1e-19
1e-22
1e-25
1e-29
1e-33
1e-38
1e-44
1e-51
1e-58
1e-67
1e-76
1e-87
1e-100
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 2 / 80 Gbit/s / 5.35km (37%)
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-27
1e-32
1e-38
1e-45
1e-53
1e-62
1e-73
1e-86
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 80 Gbit/s / 3.15km (44%)
1e-15
1e-17
1e-20
1e-23
1e-27
1e-31
1e-36
1e-41
1e-47
1e-54
1e-62
1e-71
1e-81
1e-93
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 80 Gbit/s / 3.29km (45%)
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-45
1e-53
1e-62
1e-73
1e-85
1e-99
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]
BER
BER - PMD 3.1 / 80 Gbit/s / 3.44km (46%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-27
1e-32
1e-38
1e-45
1e-53
1e-63
1e-75
1e-89
-20
200
400
687
Run Number
BER
BER - PMD 3.1 / 80 Gbit/s / 3.59km (47%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-34
1e-41
1e-49
1e-59
1e-70
1e-84
1e-100
-6
50
100
150
217
Run Number
BER
BER - PMD 4 / 80 Gbit/s / 2.85km (54%)
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-54
1e-63
1e-74
1e-87
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 4 / 80 Gbit/s / 2.95km (55%)
1e-9
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-23
1e-28
1e-33
1e-39
1e-46
1e-55
1e-65
1e-77
1e-91
-18
100
200
300
400
500
625
Run Number


BER
BER - PMD 4 / 80 Gbit/s / 3.06km (56%)
1e-6
1e-8
1e-10
1e-13
1e-16
1e-20
1e-25
1e-31
1e-38
1e-46
1e-56
1e-68
1e-83
-5
50
100
150
180
Run Number


BER
BER - PMD 8 / 80 Gbit/s / 1.89km (88%)
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-30
1e-35
1e-41
1e-48
1e-56
1e-65
1e-76
1e-89
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 8 / 80 Gbit/s / 1.93km (89%)
1e-11
1e-13
1e-16
1e-19
1e-22
1e-26
1e-31
1e-36
1e-43
1e-51
1e-60
1e-70
1e-83
1e-98
-0.03
0.2
0.4
0.6
0.8
1.03
Run Number [1e3]


BER
BER - PMD 8 / 80 Gbit/s / 1.98km (90%)
1e-8
1e-10
1e-12
1e-14
1e-17
1e-20
1e-24
1e-29
1e-35
1e-41
1e-49
1e-58
1e-69
1e-82
1e-98
-25
200
400
600
843
Run Number

Anexo 2

TRABALHOS PUBLICADOS RELACIONADOS AO TEMA

ABBADE, A. L. R.; RIBEIRO, J. A. J.; SILVEIRA, M. Efeito da dispersão por modo de polarização em sistemas com altas taxas de transmissão em fibras ópticas monomodo. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND COMPUTER EDUCATION, 2007, Monguagua. *Anais*. Monguagua: 2007.

ABBADE, A. L. R.; SILVEIRA, M.; BERNARDES, J. L.; SANTOS, B. L. L. Analysis of the effect of polarization mode dispersion in the high transmission rates in optical fiber. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION, 2004, Santos. *Anais*. Santos: 2004.

ABBADE, A. L. R. *Aplicação do OTDR na análise de problemas de atenuação em fibras ópticas: estudo de casos*. Santa Rita do Sapucaí, 2002. 60f. Monografia (Especialização em engenharia de redes e sistemas de telecomunicações) – Instituto Nacional de Telecomunicações.

ABBADE, A. L. R.; CAPUTO, M. R. C. Aplicação do OTDR na análise de problemas de atenuação em fibras ópticas: estudo de casos. In: SEMANA INTERNACIONAL DAS TELECOMUNICAÇÕES, 2002, Santa Rita do Sapucaí, *Anais*, 2002. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações, 2002. p. 243-251.

ABBADE, A. L. R.; CAPUTO, M. R. C. Aplicação do OTDR na análise de problemas de atenuação em fibras ópticas: estudo de casos. *Revista Telecomunicações*. Santa Rita do Sapucaí, v.5 , n. 2 , p. 25-33, dez. 2002.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] PAIVA, R. B. *Estudo dos efeitos não lineares de automodulação de fase e modulação de fase cruzada em fibras ópticas*. Santa Rita do Sapucaí, 2003. 128f. Dissertação (Mestrado em Telecomunicações) – Instituto Nacional de Telecomunicações.

[2] AGRAWAL, G. P. *Nonlinear fiber optics.* 3. ed. San Diego: Academic Press, 2001.

[3] ITU-T. *G.652:* Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. Geneva, 2003.

[4] YARIV, A.; YEH, P. *Photonics: Optical electronics in modern communications*. 6th. Ed. New York: Oxford University Press, 2007.

[5] RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. *Optical Networks.* San Francisco: Academic Press, 1998.

[6] SENIOR, J. M. *Optical fiber communications.* 2. ed. New York: Prentice-Hall, 1992.

[7] RIBEIRO, J. A. J. *Comunicações Ópticas*. São Paulo: Editora Érica, 2003.

[8] KOCH, L. T.; KOREN, U. Semiconductor lasers for coherent optical fiber communications. *IEEE J. Lightwave Tech*. v. 8, n. 3, p. 274-293, Mar., 1990.

[9] GREEN JUNIOR, P. E. *Fiber optic networks*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

[10] DAVIES, C. C. *Lasers and electro-optics: fundamentals and engineering.* Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

[11] BUCK, J. A. *Fundamentals of optical fibers.* New York: John Wiley, 1995.

[12] KEISER, G. *Optical Fibers Communications*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.

[13] ABBADE, A. L. R. *Aplicação do OTDR na análise de problemas de atenuação em fibras ópticas: estudo de casos*. Santa Rita do Sapucaí, 2002. 60f. Monografia (Especialização em engenharia de redes e sistemas de telecomunicações) – Instituto Nacional de Telecomunicações.

[14] ABBADE, A. L. R.; CAPUTO, M. R. C. Aplicação do OTDR na análise de problemas de atenuação em fibras ópticas: estudo de casos. *Revista Telecomunicações*. Santa Rita do Sapucaí, v.5 , n. 2 , p. 25-33, dez. 2002.

[15] ABBADE, A. L. R.; CAPUTO, M. R. C. Aplicação do OTDR na análise de problemas de atenuação em fibras ópticas: estudo de casos. In: SEMANA INTERNACIONAL DAS TELECOMUNICAÇÕES, 2002, Santa Rita do Sapucaí, *Anais*, 2002. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações, 2002. p. 243-251.

[16] RAMO, S.; WHINNERY, J. R.; VAN DUZER, T. *Fields and waves in communication eletronics.* 3. ed. New York: John Wiley, 1994.

[17] CAPUTO, M. R. C. *Sistemas de Comunicações Ópticas.* Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações, 2001.

[18] GLOGE, D. Weakly guiding fibers. *Appl. Opt*., v. 10, n. 10, p. 2252-2258, Oct., 1971.

[19] VALENTE, L. C. G. et al. Técnicas de leitura para sensores a fibra óptica baseados em redes de Bragg. In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS, 6, 2002, Salvador. *Anais*. Salvador: 2002.

[20] COLLIN, R. E. *Foundations for microwave engineering.* 2. ed. New York: Mc-Graw-Hill, 1994.

[21] ALONSO, M.; FINN, E.J. *Física, um curso universitário*, v. 2. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1972

[22] ZHOU, J; O´MAHONY, M. J. Optical transmission system penalties due to fiber polarization mode dispersion*, IEEE Photonic Technol. Lett.*, v. 6, n. 10, p.1265-1267, oct.1994.

[23] BARCELOS, S. et al. Polarization Mode Dispersion (PMD) field measurements – an audit of brasilian newly installed fiber networks, Campinas, Fiberwork, 2002.

[24] ABBADE, A. L. R. et al. Efeito da dispersão por modo de polarização em sistemas com altas taxas de transmissão em fibras ópticas monomodo. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND COMPUTER EDUCATION, 2007, Monguagua. *Anais*. Monguagua: 2007.

[25] ABBADE, A. L. R. et al. Analysis of the effect of polarization mode dispersion in the high transmission rates in optical fiber. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION, 2004, Santos. *Anais*. Santos: 2004.

[26] PERSONIC, S. D. Receiver design for digital fiber optic communication system. *Bell Syst. Technical J.,* v. 52, n. 6, p. 843-886, Jul.-Aug., 1973.

[27] ITU-T. *G.691:* Optical interfaces for single-channel STM-64, STM-256 and other SDH systems with optical interfaces. Geneva, 2003.

[28] CAPUTO, M. R. C. *Influência da derivada da dispersão cromática e do chirp devido ao processo de modulação na compensação da dispersão cromática em sistemas DWDM*. Tese (Doutorado em Física). Departamento de Física, Universidade Federal de Minas Gerais.