



**JOÃO ARLINDO BRITO JUNIOR**

**ESPECIFICAÇÃO ESTATÍSTICA DA  
DISPERSÃO DOS MODOS DE  
POLARIZAÇÃO EM ENLACES ÓPTICOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Programa de Pós Graduação em Engenharia  
Elétrica

Rio de Janeiro, Julho de 2003

**João Arlindo Brito Junior**

**Especificação Estatística da Dispersão dos Modos de Polarização  
em Enlaces Ópticos**

**Relação da Variação do Coeficiente de PMD de Enlaces Concatenados**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro, julho de 2003



**João Arlindo Brito Jr.**

**Especificação Estatística da Dispersão  
dos Modos de Polarização em  
Enlaces Ópticos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Jean Pierre von der Weid**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Marcelo Roberto Baptista Pereira Luis Jimenez**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Luís Carlos Blanco Linares**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Rogério Passy**

Departamento de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Ney Augusto Dumont**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de agosto de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **João Arlindo Brito Junior**

Engenheiro Eletricista graduado pela Universidade Federal do Paraná em 1991. Especialização em Administração de Empresas e Negócios pela FGV e Telecomunicações pela FESP-PR. Experiência de 11 anos no setor de telecomunicações nas áreas de manufatura de fibras e cabos ópticos, implantação de sistemas de transmissão, dados e voz, inclusive com períodos de trabalho e estudos no exterior. Autor de artigos nacionais e internacionais.

#### Ficha Catalográfica

Brito Junior, João Arlindo

Especificação estatística da dispersão dos modos de polarização em enlaces ópticos: relação da variação do coeficiente de PMD de enlaces concatenados / João Arlindo Brito Junior; orientador: Jean Pierre von der Weid. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

67 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. PMD. 3. Avaliação estatística. 4. Enlaces ópticos. 5. Seções amplificadas. 6. Medidas ópticas. 7. Fibras ópticas. I. Weid, Jean Pierre von der. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

**Para meus pais João e Neuza, Soninha e Maria Júlia.**

## **Agradecimentos**

À Soninha, minha companheira nos altos e baixos da minha vida.

À minha filha Maria Júlia, com quem reaprendi a beleza da vida.

Aos meus pais João e Neuza, por tudo que fizeram por mim.

Aos meus avós, Cecília, Rodolfo e Orlandina, inesquecíveis.

Ao amigo Agnaldo, com quem compartilhei mais esta jornada do mestrado.

À amiga Danúbia, pela acessoria lingüística.

Ao professor Jean Pierre, pela orientação e aprendizagem.

À Intelig, pela permissão no uso dos dados e pela ajuda financeira na apresentação dos papers.

À Vice Reitoria Acadêmica da PUC, pela bolsa concedida.

Às minhas irmãs Vânia e Simone, pelo carinho recebido.

Aos amigos Álvaro e Anna, pelo apoio, discussões e tudo mais que uma amizade propicia.

Aos amigos Serginho e Jô, com quem descobri que nunca é tarde para se fazer grandes amizades.

À família da minha mulher, em especial a minha sogra Matilde, pelo carinho e atenção.

## Resumo

Brito Junior, João Arlindo. **Especificação Estatística da Dispersão dos Modos de Polarização em Enlaces Ópticos**. Rio de Janeiro, 2003. 62 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Projetistas de sistemas de comunicações ópticas necessitam estimar o coeficiente de PMD dos enlaces ópticos visando determinar a correspondente penalidade de potência do enlace.

Os valores de PMD nas fibras variam aleatoriamente, conseqüentemente a determinação da PMD dos enlaces deverá ser calculada através de metodologias estatísticas.

Esta dissertação contém um estudo sistemático da estimação do coeficiente de PMD das seções amplificadas de 02 backbones. Três 03 técnicas estatísticas: Técnica de Monte Carlo, Modelo Gama e Teorema do Limite Central Generalizado, recomendadas pelo Método 1 da norma TIA/EIA TSB 107 foram usadas e os resultados comparados com os valores medidos em campo destas seções.

Os resultados das avaliações realizadas mostraram que a metodologia apresentada por esta recomendação induz a uma superestimação do coeficiente de PMD do enlace devido a limitação dos equipamentos de medição e conseqüentemente a uma superestimação da penalidade prevista. Esta superestimação deve-se ao fato da PMD das fibras estar abaixo do limite de sensibilidade dos equipamentos de medida comercialmente disponíveis.

A estimação do coeficiente de PMD de enlaces requer então a utilização de equipamentos de medida mais precisos (ainda não disponíveis) ou corrigir esta metodologia de cálculo para a estimação da PMD dos enlaces ópticos com a utilização de fibras/cabos de maior comprimento.

## Palavras-chave

PMD; Enlaces Ópticos; Seções Amplificadas; Avaliação Estatística; Medidas Ópticas; Fibras Ópticas.

## Abstract

Brito Junior, João Arlindo. **Especificação Estatística da Dispersão dos Modos de Polarização em Enlaces Ópticos**. Rio de Janeiro, 2003. 62 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Optical system designers need to estimate the expected PMD coefficient of the links in order to calculate the corresponding power penalty.

Fiber PMD values varies randomly, therefore the link PMD estimation shall be calculated by statistical methodologies.

This thesis presents a systematic study of PMD estimation of the amplified spans of two backbones. Three statistical techniques: Monte Carlo Technique, Gamma Model and Generalized Central Limit Theorem, recommended by Method 1 from TIA/EIA TSB 107 Guideline were used and the results compared with the field measurement values of these spans.

Evaluation results showed that this methodology cause an overestimation of the link PMD coefficient due to a limitation of the measurement equipments and consequently an overestimation of the power penalty. This overestimation is due to the fact that fiber PMD is bellow of the resolution limit of the commercially available measurement equipments.

Link PMD coefficient estimation needs the use of more precise measurement equipment (Not available yet) or to correct this calculus methodology for the optical link PMD estimation with the use of longer fibers/cables.

## Key words

PMD; Optical Links; Amplified Spans; Statistical Evaluation; Optical Measurements; Optical Fibers.



**Para viver, nasci.  
Pablo Neruda**

# Sumário

<b>Introdução</b>	<b>1</b>
 <b>1 Teoria da Dispersão dos Modos de Polarização – PMD</b>	 <b>4</b>
1.1 Definição da PMD	4
1.2 Causas da PMD	5
1.3 Acoplamento dos Modos e Estados Principais de Polarização	7
1.4 Caracterização Estatística da PMD em Fibras com Acoplamento de Modo	9
 <b>2 Métodos de Medida da PMD</b>	 <b>12</b>
2.1 Método da Análise Fixa	12
2.2 Método Interferométrico	16
2.3 Correspondência entre os Métodos de Medida	18
 <b>3 Especificação Estatística da Dispersão dos Modos de Polarização em Cabos de Fibra Óptica</b>	 <b>20</b>
3.1 Introdução	20
3.2 Considerações Importantes	21
3.2.1 Concatenação pela Média Quadrática	21
3.2.2 Variação Maxwelliana do DGD	22
3.3 Definições e Cálculos para o Método 1	26
3.3.1 Técnica de Monte Carlo	27
3.3.2 Técnica do Modelo Gama	28
3.3.3 Teorema do Limite Central Generalizado	30
 <b>4 Estimação do Coeficiente de PMD em Enlaces Ópticos</b>	 <b>31</b>
4.1 Descrição da Avaliação através do Método 1	31
4.2 Definições de Cálculo	33
4.3 Resultados Obtidos pela Técnica de Monte Carlo	36
4.4 Resultados Obtidos pelo Modelo Gama e Teorema do Limite Central Generalizado	41
4.5 Concatenação pela Média Quadrática	44

<b>5 Conclusão</b>	<b>49</b>
<b>6 Glossário</b>	<b>52</b>
<b>7 Referências Bibliográficas</b>	<b>53</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> - O efeito da PMD, em um sistema de comunicação digital.	5
<b>Figura 2</b> – Modelo conceitual da PMD.	6
<b>Figura 3</b> – Variação da polarização de saída com $\lambda$ , (a) Um dispositivo birrefringente comum, (b) Fibra Monomodo longa; acoplamento de modo aleatório.	8
<b>Figura 4</b> – Distribuições Maxwelliana e Gaussiana.	10
<b>Figura 5</b> – Diversas montagens para o teste de análise fixa.	13
<b>Figura 6</b> – Medida da PMD de uma fibra HiBi pelo Método de varredura de comprimento de onda.	14
<b>Figura 7</b> – Medida da PMD de uma fibra normal pelo método de varredura de comprimento de onda.	15
<b>Figura 8</b> – Medida de PMD por interferometria, (c) Medida de uma fibra HiBi pelo método interferométrico, (d) Medida de uma fibra normal pelo método interferométrico.	17
<b>Figura 9</b> – DGD versus o comprimento de onda.	23
<b>Figura 10</b> – Função de distribuição de Maxwell.	23
<b>Figura 11</b> – Determinação de $PMD_Q$ .	26
<b>Figura 12</b> - Universo e amostragem do coeficiente de PMD do fabricante A	35
<b>Figura 13</b> – Universo e amostragem do coeficiente de PMD do Fabricante B.	35
<b>Figura 14</b> - Universo e amostragem do coeficiente de PMD do Fabricante C	36
<b>Figura 15</b> - Valores medidos versus simulação estatística para o Fabricante A.	37
<b>Figura 16</b> - Valores medidos versus simulação estatística para o Fabricante B.	37
<b>Figura 17</b> - Valores medidos versus simulação estatística para o Fabricante C.	38
<b>Figura 18</b> – Gráfico do Modelo Gama do Fabricante A.	43
<b>Figura 19</b> – Gráfico do Modelo Gama do Fabricante B.	43
<b>Figura 20</b> – Gráfico do Modelo Gama do Fabricante C.	44
<b>Figura 21</b> – Comparação entre os valores concatenados e os medidos em campo das seções do Fabricante A	45
<b>Figura 22</b> – Comparação entre os valores concatenados e os medidos em campo das seções do Fabricante B	45
<b>Figura 23</b> - Comparação entre os valores concatenados e os medidos em campo do Fabricantes C	46

**Figura 24** - Comparação entre os valores concatenados e os medidos em campo do Fabricante C

47

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b> – Valores de S com a probabilidade associada.	25
<b>Tabela 2</b> - Seções do backbone #1	32
<b>Tabela 3</b> - Seções do backbone #2, (*) Seção desconsiderada neste estudo	33
<b>Tabela 4</b> - Valor de $PMD_Q$ , (ps/Km <sup>1/2</sup> )	42