



**Rogério do Nascimento Rebello Filho**

**Transmissão Óptica de Dados a 50 Gbit/s e  
eficiência espectral de 1 bit/s/Hz**

**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  
Co-orientador: Giancarlo Vilela de Faria

Rio de Janeiro  
Julho de 2013



**Rogério do Nascimento Rebello Filho**

**Transmissão Óptica de Dados a 50 Gbit/s e  
eficiência espectral de 1 bit/s/Hz**

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

**Prof. Jean Pierre von der Weid**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Giancarlo Vilela de Faria**

Co-orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Rodolfo Araújo de Azevedo Lima**

IPqM – Instituto de Pesquisa da Marinha

**Prof. Evandro Conforti**

UNICAMP – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação

**Prof. Guilherme Penello Temporão**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de julho de 2013

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

### **Rogério do Nascimento Rebello Filho**

Graduou-se na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro no segundo semestre de 2010. Seus atuais interesses de pesquisa são na área de comunicação óptica.

#### Ficha Catalográfica

Rebello Filho, Rogério do Nascimento

Transmissão Óptica de Dados a 50 Gbit/s e eficiência espectral de 1 bit/s/Hz / Rogério do Nascimento Rebello Filho ; orientador: Jean Pierre von der Weid ; co-orientador: Giancarlo Vilela de Faria– 2013.

67 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Comunicação Óptica. 3. Multiplexação por Divisão do Comprimento de Onda. 4. Multiplexação em Polarização. 5. Modulação ASK. 6. Modulação DQPSK 7. Eficiência Espectral. I. von der Weid, Jean Pierre. II. de Faria, Giancarlo Vilela. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

## Agradecimentos

Ao prof. Jean Pierre von der Weid pela oportunidade que me foi concedida.

Ao meu co-orientador que sempre esteve presente em todos os casos disposto a fornecer auxílio, que além de um respeito profissional, tenho uma admiração na forma de companheirismo demonstrado em todos os momentos. Muito obrigado, Giancarlo Vilela de Faria.

Ao doutor Rodolfo Lima pelo apoio na fase final.

Ao doutor Tiago Ferreira pela sua simplicidade e competência nas discussões sobre o meu trabalho.

À minha irmã e irmão pelo apoio e amparo em diversas situações.

Aos meus pais que me ajudaram a chegar até aqui.

À minha bisavó pelo apoio durante meu período da faculdade.

Aos demais amigos da PUC-Rio pelo companheirismo nesses anos.

A todos os funcionários e professores do CETUC, pelos ensinamentos adquiridos durante este período.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

E a todos aqueles que de alguma maneira tenham contribuído para a realização deste trabalho.

## Resumo

Rebello Filho, Rogerio do Nascimento; von der Weid, Jean Pierre (Orientador); de Faria, Giancarlo Vilela (Co-orientador). **Transmissão Óptica de Dados a 50 Gbit/s e eficiência espectral de 1 bit/s/Hz**. Rio de Janeiro, 2013. 67p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho realizamos uma prova da viabilidade de um sistema de comunicação óptica com capacidade de transmissão de 50 Gbit/s em uma largura de banda de 50 GHz utilizando o legado dos sistemas com taxas de 10 Gbit/s. Uma série de configurações experimentais foi testada em uma ordem de complexidade crescente para verificar separadamente as etapas e as técnicas aplicadas para o aumento da capacidade de transmissão de dados e a eficiência espectral. Em alguns casos, a curva característica resultante da configuração *back-to-back* do analisador de taxa de erro de bit média foi utilizada como referência para comparação das configurações experimentais realizadas durante o trabalho.

## Palavras-Chave

Comunicação Óptica; Multiplexação por Divisão do Comprimento de Onda; Multiplexação em Polarização; Modulação ASK; Modulação DQPSK; Eficiência Espectral.

## Abstract

Rebello Filho, Rogerio do Nascimento; von der Weid, Jean Pierre (Advisor); de Faria, Giancarlo Vilela (Co-Advisor). **Optical Data Transmission at 50 Gbit/s and spectral efficiency of 1 bit/s/Hz**. Rio de Janeiro, 2013. 67p. Msc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work we perform a proof of feasibility of 50 Gbit/s transmission within a 50 GHz optical bandwidth exploring the 10 Gbit/s legacy. A series of experimental configurations were tested in an order of increasing complexity to verify separately the steps and applied techniques for increasing data transmission capacity and spectral efficiency. In some cases, the comparison of experimental configuration was made using the back-to-back configuration of the Bit Error Rate Tester.

## Keywords

Optical Communication; Wavelength Division Multiplexing; Polarization Multiplexing; ASK Modulation; DQPSK Modulation; Spectral Efficient.

## Sumário

1 Introdução	14
1.1. Sistema Básico de Comunicação Óptica utilizando Fibra Óptica	15
1.2. Motivação da utilização de Sistemas de Comunicação Óptica	17
2 Comunicação Óptica: Apresentação e Análise das Tecnologias mais Relevantes na Atualidade	19
2.1. O Transmissor Óptico e Métodos para Incremento da Capacidade e/ou Eficiência Espectral	19
2.1.1. Discussão sobre os Principais Formatos de Modulação Empregados	19
2.1.2. Discussão sobre os Principais Métodos de Multiplexação Empregados	21
2.2. O Receptor Óptico	22
3 Descrição das Técnicas Implementadas nas Configurações Experimentais	24
3.1. Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM)	24
3.2. Multiplexação em Polarização (PolMUX)	28
3.3. O Modulador	30
3.3.1. Modulador Mach-Zehnder	30
3.3.2. Modulação NRZ-ASK e VSB NRZ-ASK	33
4 Experimentos e Resultados	34
4.1. Curva de Referência: Configuração Back-to-back	34
4.2. Análise do Desempenho do Sistema sob Filtragem em DWDM	36
4.2.1. Análise de desempenho com o centro do filtro deslocado da frequência da portadora óptica	41

4.3. Avaliação do efeito da Multiplexação Densa por Divisão de Comprimento de Onda	44
4.4. Avaliação do Efeito da Multiplexação em Polarização	49
4.5. Multiplexação Densa por Divisão em Comprimento de Onda e em conjunto com Multiplexação em Polarização	52
4.6. Geração de Múltiplas Portadoras	56
5 Conclusões	64
6 Referências Bibliográficas	66



## Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama em blocos dos elementos básicos de um Sistema de Comunicação Óptica	16
Figura 2 - (a) Esquema de um sistema de comunicação com canal único ponto a ponto (b) Implementação de um sistema WDM	25
Figura 3 - Atenuação de uma fibra monomodo simples em função do comprimento de onda	27
Figura 4 - Esquema básico de multiplexação em polarização	28
Figura 5 - Diagrama em blocos do Controlador Automático de Polarização	29
Figura 6 - Diagrama Funcional do modulador Mach-Zehnder	31
Figura 7 - Estrutura de um modulador Mach-Zehnder	32
Figura 8 - Modulação no formato NRZ, (a) sinal modulante (b) sinal com modulação ASK	33
Figura 9 - Configuração Experimental para determinação da Curva de Referência	35
Figura 10 - Curva BER x Potência de entrada do receptor [dBm] na configuração back-to-back	36
Figura 11 - Configuração Experimental para análise da filtragem para técnica DWDM	37
Figura 12 - Penalidade [dB] x Espaçamento entre canais [GHz] com filtro centrado na portadora	38
Figura 13 - Diagrama de Olho para espaçamento entre Canais de 25 GHz na configuração apresentada na Figura 11	39
Figura 14 - Diagrama de Olho para espaçamento entre canais de 15 GHz	40
Figura 15 - Diversos espectros do sinal na entrada do receptor para uma taxa de erro de bit de $1E-9$ deslocando a portadora em relação ao centro do filtro	42
Figura 16 - Resultado da simulação da penalidade em função do deslocamento da frequência da portadora para uma BER = $1E-9$	43

Figura 17 - Configuração Experimental para análise da técnica de Multiplexação em Comprimento de Onda em sistema DWDM	44
Figura 18 - Espectro dos cinco canais na entrada do amplificador óptico EDFA	45
Figura 19 - BER x Potência na entrada do receptor [dBm]	47
Figura 20 - BER x OSNR [dB]	49
Figura 21 - Configuração Experimental para Avaliação da Multiplexação em Polarização	50
Figura 22 - Curva BER para uma transmissão com um único canal e para uma transmissão usando 2 canais de 10Gbit/s utilizando a técnica de multiplexação em polarização	51
Figura 23 - 50 Gbit/s utilizando POLMUX em conjunto com um sistema UDWDM de 50GHz	52
Figura 24 - Espectros dos 3 canais polarizados verticalmente e espectro pontilhado dos dois canais restantes com polarização ortogonal	53
Figura 25 - Espectro dos cinco canais de comunicação adquiridos na saída do módulo transmissor	54
Figura 26 - (a) Espectro dos canais com centrados no máximo do filtro utilizado para e demultiplexação e (b) o mesmo espectro com a frequência deslocada em relação ao valor de máximo do filtro	55
Figura 27 - Sinal de realimentação utilizado para alimentar o controlador automático de polarização	56
Figura 28 - Geração de Múltiplas Portadoras	57
Figura 29 - Espectro do sinal na saída do modulador Mach-Zehnder simples de geração de múltiplas portadoras	58
Figura 30 - Configuração experimental para verificação do desempenho do gerador de multiportadoras	58
Figura 31 - Espectro dos sinais modulados utilizando a técnica de geração de multiportadoras	59
Figura 32 - Espectro do sinal antes do segundo demultiplexador com o canal central desligado	60
Figura 33 - Espectro do canal central após a filtragem realizada pelo segundo demultiplexador	61
Figura 34 - Desempenho da configuração para geração de multiportadoras	62

Figura 35 - Taxa média de erro de bits média x OSNR [dB] correspondente ao canal central

63

## Lista de Abreviações

ASE - Emissão Espontânea Amplificada (*Amplified Spontaneous Emission*)

ASK - Chaveamento de Amplitude (*Amplitude Shift Keying*)

BER - Taxa de Erro de Bits (*Bit Error Ratio*)

CETUC - Centro de Estudos em Telecomunicação da PUC-Rio

CD - Dispersão Cromática (*Chromatic Dispersion*)

CDM - Multiplexação por Divisão de Código (*Code Division Multiplexing*)

CW - Onda Contínua (*Continuous Wave*)

DEMUX - Demultiplexador (*Demultiplexer*)

DQPSK - Modulação diferencial por chaveamento de fase em quadratura (*Differential Quadrature Phase Shift*)

DWDM - Multiplexagem Densa por Divisão de Comprimento de Onda (*Dense Wavelength Division Multiplexing*)

DSP - Processadores de Sinais Digitais (*Digital Signal Processors*)

DBPSK - Modulação diferencial binária por chaveamento de fase (*Differential Binary Phase Shift Keying*)

EDFA - Amplificador a Fibra Dopada com Érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier*)

FEC - Códigos Corretores de Erros (*Forward Error Control*)

FPGA - (*Field-Programmable Gate Array*)

LED - Diodo Emissor de Luz (*Light Emitting Diode*)

LNA - Amplificador de Baixo Ruído (*Low Noise Amplifier*)

MZM - Modulador Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder Modulator*)

MUX - Multiplexador (*Multiplex*)

NRZ - Não Retorna a Zero (*Non-Return-to-Zero*)

OOK - Chaveamento Liga-Desliga (*On-Off Keying*)

OSA - Analisador de Espectro Óptico (*Optical Spectrum Analyzer*)

OSNR - Relação Sinal-Ruído Óptico (*Optical Signal-to-Noise Ratio*)

PMD - Dispersão dos Modos de Polarização (*Polarization Mode Dispersion*)

PRBS - Sequência Binária Pseudo-Aleatória (*Pseudo-Random Binary Sequence*)

RF - Rádio Frequência (*Radio Frequency*)

RX - Receptor (*Reception*)

RZ - Retorno ao Zero (*Return-to-Zero*)

SDM - Multiplexação por Divisão do Espaço (*Space Division Multiplexing*)

TX - Transmissor (*Transmission*)

TDM - Multiplexação por Divisão do Tempo (*Time Division Multiplexing*)

VSB - Banda Lateral Vestigial (*Vestigial Sideband*)

WDM - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (*Wavelength Division Multiplex*)