



**Paulo Sérgio
de Brito André**

**Componentes optoelectrónicos para redes fotónicas
de alto débito**



**Paulo Sérgio
de Brito André**

**Componentes optoelectrónicos para redes fotónicas
de alto débito**

dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Física, realizada sob a orientação científica do Doutor João de Lemos Pinto, Professor Catedrático do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

o júri

presidente

Doutor José Joaquim Cristino Teixeira Dias
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor José Rodrigues Ferreira da Rocha
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor João de Lemos Pinto
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor Henrique José Almeida da Silva
Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Doutor José Luís Campos de Oliveira Santos
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Doutor José Maria Longras Figueiredo
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Algarve

Doutor Armando Humberto Moreira Nolasco Pinto
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

O trabalho apresentado nesta tese contou com a contribuição de inúmeras pessoas e instituições. Sem menosprezar todas as contribuições, gostaria de referir as mais substanciais.

Em primeiro lugar, ao meu orientador Prof. Doutor João de Lemos Pinto pela oportunidade, pelo apoio e empenho pessoal manifestado e pela confiança em mim demonstrada nos últimos anos.

Ao Prof. Doutor José Ferreira da Rocha por todo o apoio e confiança em mim colocada, nomeadamente, na atribuição da bolsa de doutoramento.

Agradeço ao Prof. Doutor Hypolito Kalinwshoki pelas condições fornecidas e pela contribuição no estudo de redes de Bragg, enquanto visitei o Centro Federal de Tecnologia do Paraná.

Aos meus colegas e amigos Prof. Doutor António Teixeira e Prof. Doutor Armando Nolasco Pinto pelo incansável apoio no decurso desta tese.

À Dr. Teresa Almeida, ao Mestre Marcelino Pousa, ao Eng. Fernando Morgado e ao Mestre Rui Sá da Portugal Telecom Inovação pelo imenso apoio que me deram na implementação e testes laboratoriais.

À Prof^a. Doutora Maria do Carmo Madeiros da Universidade do Algarve por tudo o que me transmitiu no estudo de amplificadores ópticos semicondutores.

À Mestre Rosário Correia do Departamento de Física da Universidade de Aveiro pela ajuda na realização das medidas laboratoriais de Raman.

Ao Prof. Doutor Paulo Monteiro pelos ensinamentos que me transmitiu desde que cheguei ao Instituto de Telecomunicações na área das altas frequências, e pelo apoio que sempre me dispensou.

Ao Eng. Orlando Frazão do INESC-Porto pela contribuição no estudo de redes de Bragg gravadas em fibras ópticas.

Os meus agradecimentos são também, dirigidos a todos os colegas e funcionários do Instituto de Telecomunicações por todo o apoio prestado.

Gostaria de entre estes referir as contribuições do Mestre Mário Lima, Eng. Rogério Nogueira, Mestre Mário Rui, Prof. Doutor Nuno Borges, Mestre Paulo Almeida, Mestre Tiago Maia, Eng. Jorge Pinto e Mestre Pedro Tavares.

Gostaria ainda de agradecer às seguintes instituições: à Universidade de Aveiro e ao Instituto de Telecomunicações – Aveiro, onde foi realizado o trabalho científico aqui descrito; ao Centro Federal de Tecnologia do Paraná no Brasil que me acolheu temporariamente; à Fundação para a Ciência e Tecnologia que através do Programa PRAXIS XXI, e do projecto DAWN, providenciou os recursos financeiros necessários à minha manutenção mensal, ao pagamento das propinas e à participação em diversas conferências científicas; ao INESC-Porto e à PUC – Rio de Janeiro pelo fornecimento de redes de Bragg; à Portugal Telecom Inovação pela disponibilização de condições materiais e equipamento utilizados e à Portugal Telecom que contribuiu indirectamente através do financiamento de diversos projectos de investigação e desenvolvimento (EMITON, CAMADA, O-NODE, ANDES), onde foi possível realizar parte do trabalho científico aqui apresentado.

À Maria Rute, pela paciência demonstrada e pelo apoio na redacção desta tese.

Para todos, um bem haja.

Paulo André

resumo

O presente trabalho tem por objectivo o estudo dos diversos componentes optoelectrónicos que constituem uma rede fotónica, com vista ao aumento da flexibilidade, débito, conectividade e desempenho.

Para tal, são analisados os blocos e funções essenciais que permitem a implementação de uma rede óptica transparente e multiplexada no comprimento de onda.

Inicialmente, caracterizaram-se os diversos componentes optoelectrónicos envolvidos em redes ópticas multi-comprimento de onda, tendo-se dado uma ênfase especial ao meio de transporte de informação, nomeadamente, às propriedades não lineares das fibras ópticas.

Foi implementado laboratorialmente um demonstrador de um nó óptico de extracção e inserção de canais sintonizável, baseado numa rede de Bragg gravada em fibra óptica, tendo esta configuração de nó evoluído para um estágio de protótipo comercial.

Foi, também, implementado um demonstrador de um nó óptico de cruzamento de canais, completamente reconfigurável baseado em componentes discretos disponíveis comercialmente, onde se demonstra uma arquitectura estritamente não bloqueante.

Foram estudadas as diversas técnicas de conversão de comprimento de onda e implementado um módulo capaz de realizar conversão de comprimentos de onda, no domínio óptico e independente do ritmo e formato de modulação, que suporta ritmos de transmissão até 2.5 Gbit/s, baseado na modulação cruzada do ganho num amplificador óptico semiconductor reflectivo.

Por fim, foi desenvolvida uma metodologia transparente de análise do desempenho em sistemas de comunicações ópticas utilizando amostragem assíncrona. Foi derivado um modelo para os histogramas assíncronos em função das características dos impulsos, tendo-se implementado um módulo de análise de qualidade de serviço de uma rede óptica.

abstract

The present work intends to study several optoelectronic components used in a high speed photonic network, in order to increase flexibility, debit, connectivity and performance.

The basic essentials blocks and functions to the implementation of a transparent and wavelength multiplexed optical network are analysed.

Initially, the optoelectronic components typically used in a multiwavelength network are characterised. A specific emphasis is focused on the transport medium, mainly the non-linear proprieties of the optical fibres.

A tunable optical add-drop multiplexer node demonstrator based in a fibre Bragg grating was experimentally implemented.

A completely reconfigurable optical cross connect based on commercially available discrete components was also implemented where a strictly non blocking architecture was demonstrated.

Several optical wavelength conversion techniques were studied and a wavelength conversion module working on the optical domain, independent of the bitrate and signal format, which support a 2.5, Gbit/s bitrate was implemented. This module is based on the cross gain modulation in a semiconductor optical reflective amplifier.

An optical performance monitoring transparent methodology using asynchronous sampling was developed. A numerical model for the asynchronous histograms based on the optical pulses characteristics was derived. An optical network quality of service analysing module was implemented.

índice

o júri
agradecimentos
resumo
abstract
índice
glossário de acrónimos
constantes fundamentais
listagem de símbolos gráficos

Capítulo 1. Introdução

1.1 Enquadramento, motivação e objectivos	1
1.2 Perspectiva histórica dos sistemas de comunicações ópticas	5
1.3 Estado actual da tecnologia	7
1.4 Organização da tese	9
1.5 Principais contribuições	11
1.6 Referências	12

Capítulo 2. Fibra óptica

2.1 Introdução	19
2.2 Perspectiva histórica	21
2.3 Propagação de ondas electromagnéticas em fibras ópticas	22
2.3.1 Equações de Maxwell	23
2.3.2 Modos de propagação na fibra	28
2.3.3 Fibra monomodo	31
2.3.3.1 Determinação da área eficaz da fibra	35
2.3.4 Efeitos não lineares de ordem superior	38
2.4 Propriedades lineares	40
2.4.1 Atenuação	41
2.4.1.1 Medição da atenuação	44
2.4.2 Dispersão cromática	46
2.4.2.1 Medição da dispersão cromática	50
2.4.3 Birrefringência	54
2.4.3.1 Medição da birrefringência	59
2.5 Propriedades não lineares	64
2.5.1 Dispersão inelástica estimulada	64
2.5.1.1 Dispersão estimulada de Brillouin	65
2.5.1.1.1 Medição do coeficiente de ganho de Brillouin	69
2.5.1.2 Dispersão estimulada de Raman	75

2.5.1.2.1	Medição do coeficiente de ganho de Raman	78
2.5.2	Índice de refração não linear	85
2.5.2.1	Auto modulação de fase	86
2.5.2.2	Modulação cruzada de fase	86
2.5.2.3	Mistura de quatro ondas	89
2.5.2.3.1	Determinação do índice de refração não linear	92
2.6	Modelização da fibra óptica	95
2.7	Tipos de fibra utilizados na transmissão	98
2.8	Conclusão	100
2.9	Referências	101
Capítulo 3. Componentes optoelectrónicos		
3.1	Introdução	109
3.2	Laser semiconductor	110
3.2.1	Equações de taxa	111
3.2.2	Caracterização do laser	115
3.2.3	Simulação	124
3.3	Moduladores electro-ópticos	131
3.3.1	Caracterização do modulador	132
3.3.2	Compensação da dispersão cromática	137
3.3.2.1	Verificação experimental	140
3.4	Amplificadores ópticos de fibra dopada com Érbio (EDFA)	141
3.4.1	Estrutura e princípios de funcionamento	142
3.4.2	Caracterização	148
3.5	Receptor óptico	153
3.5.1	Fotodetector	154
3.5.2	Caracterização do receptor	158
3.6	Filtros ópticos	160
3.6.1	Filtros não integrados na fibra	160
3.6.1.1	Filtro interferométrico de cavidade Fabry-Perot	160
3.6.1.2	Filtro baseado em redes de difracção	162
3.6.1.3	Filtro baseado em camadas periódicas dieléctricas	163
3.6.2	Redes de Bragg gravadas em fibras ópticas	164
3.6.2.1	Fundamentos das redes de Bragg	165
3.6.2.2	Caracterização	173
3.7	Conclusão	178
3.8	Referências	178
Capítulo 4. OADM - Nó óptico de extracção e inserção de canais		
4.1	Introdução	185
4.2	Especificação de um arquitectura para o OADM	186
4.3	Implementação e teste do OADM	188
4.4	OADM selectivo	195
4.5	Protótipo de um OADM	201
4.5.1	Definição do cenário de simulação	202
4.5.2	Características requeridas para o OADM	203
4.5.3	Implementação e testes de caracterização do protótipo	207
4.6	Conclusão	210
4.7	Referências	210

Capítulo 5. OXC - Nó óptico de cruzamento de canais	
5.1 Introdução	213
5.2 Especificação das funcionalidades do OXC a implementar	215
5.3 Implementação física do OXC	223
5.3.1 Tempo de configuração	224
5.3.2 Perdas de inserção	225
5.3.3 Capacidade de configuração	226
5.3.4 Degradação da relação sinal/ruído óptica	229
5.3.5 Degradação da taxa de erro binário	231
5.4 Simulação do OXC	235
5.4.1 Taxa de erro binário	235
5.4.2 Encadeamento	237
5.5 Conclusão	239
5.6 Referências	240
Capítulo 6. Conversão óptica de comprimento de onda	
6.1 Introdução	243
6.2 Técnicas de conversão de comprimento de onda	244
6.3 Modulação cruzada do ganho	247
6.4 Implementação experimental	251
6.4.1 Caracterização do RSOA	251
6.4.2 Análise do desempenho da XGM	256
6.5 Conclusão	261
6.6 Referências	262
Capítulo 7. Monitorização óptica do desempenho	
7.1 Introdução	265
7.2 Avaliação do desempenho de sistemas digitais	266
7.3 Monitorização óptica	270
7.4 Histogramas de amplitude assíncronos	273
7.4.1 Factor Q assíncrono	274
7.4.2 Modelo para histogramas assíncronos	277
7.4.3 Factor Q assíncrono na presença de degradação da forma do impulso	285
7.4.4 Estimativa da BER	290
7.5 Conclusão	293
7.6 Referências	293
Capítulo 8. Conclusões e trabalho futuro	
8.1 Conclusões do trabalho realizado	297
8.2 Sugestões de trabalho futuro	299
Anexos	
Anexo A – Potência óptica em dBm	301
Anexo B - Propriedades físicas da Sílica	302
Anexo C - Esfera de Poincaré	303
Anexo D - Plano da ITU de atribuição de frequências	305

glossário de acrónimos

<i>ac</i>	Alternate Current	Corrente alternada (análise em frequência)
ASE	Amplified Spontaneous Emission (noise)	Emissão espontânea amplificada (ruído)
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Modo de transferência assíncrono
AWG	Arrayed Waveguide Grating	Rede de difracção baseada em agregados de guias de onda
BER	Bit error ratio	Taxa de erro binário
<i>cc</i>		Complexo Conjugado
CW	Continuous Wave	Sinal em contínuo
DBR	Distributed Bragg Reflector	Reflector de Bragg distribuído (laser)
<i>dc</i>	Direct Current	Corrente contínua (análise em contínuo)
DCF	Dispersion Compensation Fibre	Fibra para a compensação de dispersão
DEMUX	Demultiplexer	Desmultiplexador
DEP		Densidade Espectral de Potência
DFB	Distributed Feed Back	Realimentação distribuída (laser)
DSF	Dispersion Shifted Fibre	Fibra de dispersão deslocada
EDFA	Erbium Doped Fibre Amplifier	Amplificador óptico de fibra dopada com Érbio
FEC	Forward Error Correction	Código corrector de erros no destino
FBG	Fibre Bragg Grating	Rede de Bragg gravada em fibra óptica
FSR	Free Spectral Range	Intervalo espectral livre
FWM	Four Wave Mixing	Mistura de quatro ondas
GVD	Group Velocity Dispersion	Dispersão da velocidade de grupo
IM	Intensity Modulated	Intensidade modulada





















IM-DD	Intensity Modulated – Direct Detection	Intensidade modulada – detecção directa
IP	Internet Protocol	Protocolo de internet
IR	Infrared	Infravermelho
ITU-T	International Telecommunications Union – Standardisation Sector	Secção normativa da união internacional de telecomunicações
LED	Light Emitting Diode	Díodo emissor de luz
LP	Linear Polarised	Polarizado linearmente
MBE	Molecular Beam Epitaxy	Feixe molecular epitaxial
MEM	Micro Electro Mechanical Systems	Sistema electro - mecânico micrométrico
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapour Deposition	Deposição gasosa química organo metálica
MQW	Multiple Quantum Well	Múltiplos poços quânticos
MUX	Multiplexer	Multiplexador
MZ	Mach Zehnder	Mach Zehnder (modulador)
NEP	Noise Equivalent Power	Potência equivalente do ruído
NF	Noise Figure	Figura de ruído
NRZ	Non Return to Zero	Não retorno a zero
NZDSF	Non Zero Dispersion Shift Fibre	Fibra de dispersão deslocada não nula
OADM	Optical Add Drop Multiplexer	Nó óptico de extracção e inserção de canais
OPM	Optical Performance Monitoring	Monitorização óptica do desempenho
OSA	Optical Spectrum Analyser	Analisador de espectros ópticos
OSNR	Optical signal to noise ratio	Razão sinal / ruído óptica
OXC	Optical Cross Connect	Nó óptico de cruzamento de canais
<i>pdf</i>	Probability Density Function	Função densidade de probabilidade
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy	Hierarquia digital plesiosíncrona
PIN	Positive – Intrinsic- Negative	Positivo – Intrínseco – Negativo (Fotodíodo)
PMD	Polarisation Mode Dispersion	Dispersão devida aos modos de polarização
PRBS	Pseudo Random Bit Sequence	Sequência de bits pseudo aleatória.
QoS	Quality of Service	Qualidade de serviço
RIN	Relative Intensity Noise	Ruído de intensidade relativa
RSOA	Reflective Semiconductor Optical Amplifier	Amplificador óptico semiconductor reflectivo
RZ	Return to Zero	Retorno a zero
SBS	Stimulated Brillouin Scattering	Dispersão estimulada de Brillouin
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	Hierarquia digital síncrona













SI		Sistema Internacional
SMF	Single Mode Fibre	Fibra monomodo (de dispersão normal)
SNR	Signal to Noise Ratio	Razão sinal/ruído
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	Amplificador óptico semiconductor
SONET	Synchronous Optical Network	Rede óptica síncrona
SPM	Self Phase Modulation	Auto modulação de fase
SRS	Stimulated Raman Scattering	Dispersão estimulada de Raman
STM	Synchronous Transport Module of SDH	Modulo de transporte síncrono do SDH
TDM	Time Domain Multiplexing	Multiplexagem no domínio temporal
TE	Transversal Electric	Campo eléctrico transversal
TM	Transversal Magnetic	Campo magnético transversal
ua		Unidades Arbitrárias
UV	Ultraviolet	Ultravioleta
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexagem no comprimento de onda
XGM	Cross Gain Modulation	Modulação cruzada do ganho
XPM	Cross Phase Modulation	Modulação cruzada de fase

constantes fundamentais

Velocidade da luz no vazio	c	299792458	m s^{-1}
Permeabilidade do vazio	μ_0	$4 \pi \times 10^{-7}$	N A^{-2}
Permitividade do vazio	ϵ_0	$8.8541878 \times 10^{-12}$	F m^{-1}
Constante de Planck	h	$6.6260688 \times 10^{-34}$	J s
Constante de Boltzmann	K_B	$1.3806503 \times 10^{-23}$	J K^{-1}
Carga eléctrica elementar	q	$1.6021765 \times 10^{-19}$	C

listagem de símbolos gráficos

Símbolo	Designação	Símbolo	Designação
	Laser contínuo		Bias-T
	Medidor de potência óptica		Filtro eléctrico
	Amplificador de fibra dopada com Érbio		Amplificador eléctrico
	Modulador tipo Mach-Zehnder		Recuperador do sinal de relógio
	Fibra óptica		Isolador óptico
	Fotodíodo		Acoplador passivo de potência
	Controlador de polarização		Rede de Bragg
	Polarímetro		Analisador de redes
	Divisor de potência óptica		Comutador óptico
	Circulador óptico		Atenuador

	Laser sintonizável		Desmultiplexador
	Analisador de espectros ópticos		Módulo transmissor com modulação externa
	Multiplexador		Filtro óptico (tipo Fabry-Perot)
	Gerador de sinais eléctricos		Amplificador óptico semiconductor reflectivo
	Fonte de alimentação		Filtro óptico sintonizável
	Osciloscópio		Receptor óptico amplificado

*“Ouvi um raio de Sol rir, tossir e cantar.
Fui capaz de ouvir uma sombra...”*

Alexander Graham Bell, 1880.

Primeira experiência de transmissão de voz,
utilizando luz solar e um *Fotofone*.

Aos meus pais

À minha mulher