



Luis Ernesto Ynoquio Herrera

**Reflectometria óptica de alta resolução
por contagem de fótons**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio

Orientador: Prof. Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro
Novembro de 2015



Luis Ernesto Ynoquio Herrera

**Reflectometria óptica de alta resolução
por contagem de fótons**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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 de Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Anderson Stevens Leônidas Gomes
UFPE

Prof. Douglas Vitoreti da Silva
UFCG

Dr. Thiago Ferreira da Silva
INMETRO

Prof. Guilherme Penello Temporão
Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Rogerio Passy
MLS - Wireless

Dr. Giancarlo Vilela de Faria
Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de novembro de 2015

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

Luis Ernesto Ynoquio Herrera

Graduo-se em Engenharia Eletrônica na Universidad Privada Antenor Orrego do Perú em 2002 e obteve o grau de Mestre em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2011.

Ficha Catalográfica

Ynoquio Herrera, Luis Ernesto

Reflectometria óptica de alta resolução por contagem de fótons / Luis Ernesto Ynoquio Herrera ; orientador: Jean Pierre von der Weid. – 2015.

121 f. : il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Reflectômetro óptico no domínio do tempo. 3. Contagem de fótons. 4. Fibras ópticas. 5. Redes ópticas passivas. I. Weid, Jean Pierre von der. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Ao meu orientador o Professor Jean Pierre von der Weid pela paciência, apoio, ensinamentos e confiança para a realização deste trabalho.

À CAPES, FAPERJ, Ericsson e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos.

Ao meu filho, Diego, por ser o motor da minha vida.

Aos meus pais, Gilber e Eumenia, pelo constante apoio e carinho.

Aos meus irmãos Junny, Carlos, Iván e Zalet, que mesmo longe estão sempre presentes.

A minha mulher, Carla, pela paciência e carinho para seguir em frente.

Aos meus amigos do laboratório de Optoeletrônica, Giancarlo, Gustavo, Diego, Maria, Andrea, Andy e Felipe pela ajuda e amizade.

Aos meus amigos de PUC-Rio pela amizade e companheirismo.

Aos professores e funcionários do CETUC pelo apoio e ensinamentos.

Resumo

Luis Ernesto Ynoquio Herrera, Jean Pierre von der Weid (Orientador). **Reflectometria óptica de alta resolução por contagem de fótons**. Rio de Janeiro, 2015. 121p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho são apresentados dois reflectômetros ópticos por contagem de fótons no domínio do tempo para o monitoramento de fibras ópticas. O primeiro foi projetado para obter faixas dinâmicas altas. Demonstrou-se a sua capacidade de sintonização no monitoramento de redes passivas WDM-PON durante o tráfego de dados. 32 dB de faixa dinâmica com 6 m de resolução foram atingidos. O segundo reflectômetro foi projetado para atingir resoluções ultra altas. As aplicações neste caso, além do monitoramento de uma rede TDM-PON de curto alcance, foram na caracterização de redes de Bragg dispersivas e na descrição e modelagem de um fenômeno não reportado antes na literatura, chamado nesta tese de *reflexão por curvatura*. Foi demonstrada uma resolução menor que 3 cm com faixa dinâmica maior que 14.0 dB.

Palavras-chave

Reflectômetro óptico no domínio do tempo; contagem de fótons; fibras ópticas; redes ópticas passivas.

Abstract

Luis Ernesto Ynoquio Herrera, Jean Pierre von der Weid (Advisor). **High resolution photon counting optical reflectometry**. Rio de Janeiro, 2015. 121p. PhD Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis presents the development of two photon counting optical time domain reflectometers for fiber optic links monitoring. The first one was focused on high dynamic range. It is demonstrated its tunable capability for a WDM-PON in-service monitoring. 32 dB on dynamic range and a two-point resolution of 6 m is achieved. The second reflectometer was design to accomplish an ultra high resolution. The monitoring of a short TDM-PON is performed. Moreover, due to its high resolution, a chirped fiber Bragg grating is characterized and a non previous reported phenomena, the *bend reflection*, is shaped and described. It is demonstrated 3 cm two-point resolution and more than 14 dB on dynamic range.

Keywords

Optical time domain reflectometer; photon counting; optical fibers; passive optical networks.

Sumário

1 . Introdução	17
1.1. Motivação	20
1.2. Organização desta tese	21
2 . Aspectos Teóricos	23
2.1. Fontes Laser	23
2.2. Fibras ópticas	25
2.3. Refletômetro óptico no domínio do tempo - OTDR	28
2.3.1. Faixa dinâmica e faixa de medição	31
2.3.2. Zona morta:	32
2.3.3. Resolução espacial:	33
2.3.4. Relação de compromisso entre a faixa dinâmica e a resolução:	33
2.3.5. <i>Coherent Rayleigh Noise</i> (CRN)	34
2.4. Redes Ópticas passivas (PON)	34
3 . Contagem de Fótons	37
3.1. Características de um equipamento para detecção de fótons únicos	39
3.1.1. Eficiência quântica	39
3.1.2. Ruído de Escuro	40
3.1.3. Afterpulse	40
3.1.4. Resolução temporal e tempo morto	41
3.1.5. Dependência do comprimento de onda	41
3.1.6. Figura de mérito	42
3.2. Técnicas para interromper a avalanche	44
3.2.1. Quenching passiva	44
3.2.2. Quenching ativa	44
3.2.3. Quenching ativa gatilhada	45
3.3. Lasers Atenuados	45
3.4. Reflectometria por contagem de fótons únicos	47
3.4.1. Free running	47
3.4.2. Modo gatilhado	48
3.4.3. Gatilhado rápido	49
3.4.4. Gatilhado semi-rápido	50

4 . Desenvolvimento dos Reflectômetros ópticos no domínio do tempo por contagem de fótons	52
4.1. OTDR de Alta faixa dinâmica: HDR-PC-OTDR.	52
4.2. OTDR de Ultra Resolução (UHR-PC-OTDR)	56
4.2.1. Algoritmo para a correção da inclinação das janelas de aquisição.	65
4.3. Descrição dos equipamentos	71
4.3.1. Fonte Laser de Banda Larga (UWS: Ultra-Wideband Source)	71
4.3.2. Semiconductor Optical Amplifier (SOA)	72
4.3.3. Gerador de Atraso Digital (DDG)	74
4.3.4. Detector de Fótons Únicos (SPAD)	74
4.3.5. Time to Digital Converter (TDC)	74
4.3.6. Arrayed Waveguide Grating (AWG)	75
5 . Resultados experimentais	77
5.1. Monitoramento de uma rede WDM-PON	77
5.2. Reflexão por curvatura	81
5.2.1. Mapeamento da reflexão por curvatura	82
5.2.2. Proposta de modelo para a reflexão por curvatura.	92
5.2.3. Discussão dos resultados da reflexão por curvatura.	102
5.3. Supervisão de uma Rede TDM-PON de curto alcance	103
5.4. Caracterização de uma rede de Bragg dispersiva	109
6 . Conclusões	113
7 . Bibliografia	115

Lista de Figuras

Figura 1.1 a) Um sistema de comunicação básico. b) Sistema de comunicação por fibra óptica. [2].	17
Figura 1.2 Montagem básica de um sistema de aquisição por contagem de fótons [10]	19
Figura 2.1 Três processos fundamentais ocorrendo entre dois níveis de energia em um átomo: (a) Absorção, (b) Emissão espontânea e (c) Emissão estimulada	23
Figura 2.2 Resonador de Fabry-Perot em um diodo laser.	25
Figura 2.3 Diferentes resultados da interação da luz com o cambio brusco no índice de refração.	25
Figura 2.4 Cone de aceitação definido pela Apertura Numérica numa fibra de índice degrau standard.	26
Figura 2.5 Evolução da capacidade de transmissão. Os pontos representam a maior capacidade reportada anualmente na <i>Optical Fiber Communications Conference</i> desde 1982 [20].	28
Figura 2.6 Traço típico de um OTDR [7]	29
Figura 2.7 Diagrama de blocos de um OTDR [7]	30
Figura 2.8 Faixa dinâmica e faixa de medição [7]	32
Figura 2.9 <i>Event deadzone</i> e <i>Attenuation deadzone</i> [7]	33
Figura 2.10 Arquitetura básica de uma rede WDM-PON	35
Figura 2.11 Diagrama de blocos para a supervisão de uma rede WDM-PON	36
Figura 3.1 Fluxo médio de fótons vs potência óptica [32]	37
Figura 3.2 Modo Gatilhado	48
Figura 3.3 Modo Gatilhado Rápido	50
Figura 3.4 Modo Gatilhado Semi-rápido	51
Figura 4.1 Montagem experimental do HDR-PC-OTDR	52
Figura 4.2 Interface gráfica do software de aquisição do HDR-PC-OTDR.	54

Figura 4.3 Faixa dinâmica e resolução do HDR-PC-OTDR	55
Figura 4.4 Montagem experimental do UHR-PC-OTDR	56
Figura 4.5 Interface gráfica do software de aquisição desenvolvido em LabView.	58
Figura 4.6 Resolução atingida pelo UHR-PC-OTDR	59
Figura 4.7 Janela de aquisição apresentando uma oscilação no nível de detecção no início e no final. No final da janela o nível de contagens é zero.	60
Figura 4.8 Aumento das contagens de escuro evidenciado na janela que contem dois níveis de intensidade diferentes. O efeito é maior quando a taxa de gatilhamento aumenta.	60
Figura 4.9 Potência média de saída do SOA em função da voltagem de gatilhamento num pulso de 4 ns.	62
Figura 4.10 Decaimento do número de contagens dentro em cada janela.	62
Figura 4.11 Probabilidade de detectar um fóton dentro de uma janela.	63
Figura 4.12 a) Decaimento do número de contagens numa janela em função da distância para 3 taxas de contagens. b) Ajuste linear. A taxa de gatilhamento foi de 29 kHz.	64
Figura 4.13 a) Inclinação em função da taxa contagens, b) a intensidade normalizada em função da inclinação.	65
Figura 4.14 Intervalo inicial, considerado como nível de Rayleigh no começo de uma janela de aquisição.	66
Figura 4.15 Fluxograma principal do algoritmo para a correção do decaimento nas janelas de aquisição.	67
Figura 4.16 Sequência de correção para uma janela com dois picos (ou perdas) e 3 níveis de intensidade: S_1 , S_2 e S_3 .	68
Figura 4.17 Fluxograma "Tipo de Janela" baseada no ℓ_1 Filter	69
Figura 4.18 Resultado do filtro ℓ_1 em três tipos de janela. a) Janela tipo <i>regular</i> , b) Janela tipo <i>regular</i> , com um nível de ruído maior, c) Janela tipo <i>peak</i> e d) tipo <i>loss</i> .	70
Figura 4.19 Espectro do ASE do SOA para diferentes correntes quiescentes em CW.	72

Figura 4.20 Espectro do ASE do SOA para diferentes correntes de pico pulsadas	73
Figura 4.23 Espectro de transmissão do AWG para bandas diferentes.	75
Figura 4.24 Espectro de transmissão para um canal do AWG.	76
Figura 5.1 Montagem experimental do para o monitoramento de uma rede WDM-PON.	78
Figura 5.2 Traço do HDR-PC-OTDR para os canais #1 e #2 do AWG.	80
Figura 5.3 Comparação entre a transmissão de dados na banda C com e sem monitoramento na banda L.	81
Figura 5.4 Exemplo de uma reflexão por curvatura.	82
Figura 5.5 Montagem experimental para medição da reflexão por curvatura.	82
Figura 5.6 OTDR para diferentes raios de curvatura e distâncias angulares.	83
Figura 5.7(a) Variação da perda em função do número de voltas para dois raios de curvatura. (b) Diferença entre o nível do pico e o nível de Rayleigh em função do raio de curvatura.	84
Figura 5.8 Esquemático da estrutura experimental aperfeiçoada para medição de reflexões por curvatura usando o UHR-PC-OTDR.	86
Figura 5.9 Traço do UHR-PC-OTDR para um raio de curvatura de 4.8 mm e diferentes distâncias angulares.	87
Figura 5.10 Traço do UHR-PC-OTDR para um raio de curvatura de 4.8 mm e diferentes distâncias angulares (média de 5 medidas).	87
Figura 5.11 (a) Variação da perda e (b) Diferença entre o nível do pico e o nível de Rayleigh em função da distância angular para um raio de curvatura de 4.8 mm.	88
Figura 5.12 Traço do UHR-PC-OTDR para um raio de curvatura de 7.3 mm e diferentes distâncias angulares (média de 5 medidas).	88
Figura 5.13 Variação da perda e do pico em função da distância angular para vários raios de curvatura.	89
Figura 5.14 (a) Variação da perda e (b) do pico em função da distância angular para um raio de curvatura de 4.8 mm medido em outro ponto da fibra.	90

Figura 5.15 Montagem para medição de reflexões por curvatura incluindo um posicionador linear.	91
Figura 5.16 Três sequências de medições de (a) Variação da perda e (b) do pico, em função da localização da curvatura na fibra, para um raio de 4.8 mm e distância angular de 180°.	92
Figura 5.17 Três sequências de medições de (a) Variação da perda e (b) do pico, em função da localização da curvatura na fibra, para três raios diferentes com uma distância angular de 180°.	92
Figura 5.18 UHR-PC-OTDR para a união de uma fibra DS e uma standard.	93
Figura 5.19 Diagrama de blocos da simulação da transmissão de um pulso do UHR-PC-OTDR por uma zona de curvatura na fibra e cálculo da parcela de potência que chega ao detector.	97
Figura 5.20 Simulação de uma fibra curvada vista por um OTDR. O gráfico inserido apresenta, em detalhe, as zonas de transição. Parâmetros: $a=4.2 \mu\text{m}$, $n_1=1.4682$, $n_2=1.4628$, $\lambda=1545 \text{ nm}$, $S=0.0016$, $S_{\text{modif}}=0.0183$, $\theta_{\text{tran}}=10^\circ$, $\alpha_k=995 \text{ dB/m}$.	99
Figura 5.21 Simulação obtida com os mesmos parâmetros da Figura 5.20, para diferentes distâncias angulares.	100
Figura 5.22 Comparação entre a simulação e as medidas da Figura 5.14. Parâmetros: $a=4.2 \mu\text{m}$, $n_1=1.4682$, $n_2=1.4628$, $\lambda=1545 \text{ nm}$, $S=0.0016$, $S_{\text{modif}}=0.0183$, $\theta_{\text{tran}}=10^\circ$, $\alpha_k=995 \text{ dB/m}$.	100
Figura 5.23 Comparação entre a simulação e as medidas da Figura 5.13c e Figura 5.13d. Parâmetros: $a=4.16 \mu\text{m}$, $n_1=1.4682$, $n_2=1.4628$, $\lambda=1545 \text{ nm}$, $S=0.0016$, $S_{\text{modif}}=0.0991$, $\theta_{\text{tran}}=10^\circ$, $\alpha_k=670 \text{ dB/m}$.	101
Figura 5.24 Comparação entre a simulação e as medidas da Figura 5.13a e Figura 5.13b. Parâmetros: $a=4.26 \mu\text{m}$, $n_1=1.4682$, $n_2=1.4628$, $\lambda=1545 \text{ nm}$, $S=0.0016$, $S_{\text{modif}}=0.0850$, $\theta_{\text{tran}}=8^\circ$, $\alpha_k=863 \text{ dB/m}$.	101
Figura 5.25 Comparação entre a simulação e as medidas da Figura 5.13e e Figura 5.13f. Parâmetros: $a=4.13 \mu\text{m}$, $n_1=1.4682$, $n_2=1.4628$, $\lambda=1545 \text{ nm}$, $S=0.0016$, $S_{\text{modif}}=0.0160$, $\theta_{\text{tran}}=12^\circ$, $\alpha_k=391 \text{ dB/m}$.	102
Figura 5.26 Comparação entre a simulação e as medidas da Figura 5.13g e Figura 5.13h. Parâmetros: $a=4.00 \mu\text{m}$, $n_1=1.4682$, $n_2=1.4628$, $\lambda=1545 \text{ nm}$, $S=0.0016$, $S_{\text{modif}}=0.0290$, $\theta_{\text{tran}}=19^\circ$, $\alpha_k=251 \text{ dB/m}$.	102
Figura 5.27 Montagem experimental de uma rede PON 1x4.	103

Figura 5.28 Divisor passivo 1x4 visto pelo UHR-PC-OTDR.	104
Figura 5.29 Comparação do UHR-PC-OTDR e um OTDR convencional (3ns resolução) na medida de um divisor passivo 1x4.	104
Figura 5.30 Traço corrigido do UHR-PC-OTDR na rede PON da Figura 5.27.	105
Figura 5.31 Detalhe do tramo inicial da rede PON (<i>feeder</i>) antes e depois da correção feita com o algoritmo da Figura 4.15 .	105
Figura 5.32 Traço do UHR-PC-OTDR da rede PON com uma curvatura induzida na Fibra3 .	106
Figura 5.33 Traço do UHR-PC-OTDR da PON com curvatura induzida na Fibra 3. PON com as 4 fibras conectadas (traço azul) e com só a Fibra 3 conectada (traço vermelho).	107
Figura 5.34 Detalhe do tramo inicial da rede PON (<i>feeder</i>) antes e depois da correção, para uma taxa de contagens de 6.3 kHz.	108
Figura 5.35 Traço corrigido do UHR-PC-OTDR na PON, para uma taxa de contagens de 6.3 kHz. A faixa dinâmica obtida é de 14.2 dB aproximadamente.	108
Figura 5.36 Montagem do UHR-PC-OTDR para a caracterização de uma rede de Bragg dispersiva. a: Corpo do circulador, b e d: Conexão APC, c: Filtro passa-banda, e: Rede dispersiva, f: final da fibra.	110
Figura 5.37 Traço do UHR-PC-OTDR para montagem da Figura 5.36.	110
Figura 5.38 Caracterização da rede de Bragg dispersiva obtida com o OSA (traço azul) e o UHR-PC-OTDR (traço vermelho).	111
Figura 5.39 Curva de correção para os níveis de potência em função do comprimento de onda.	111
Figura 5.40 Comprimento físico da rede dispersiva. Usando a relação dada pela velocidade da luz e o índice de refração efetivo dentro da rede o comprimento é aproximadamente 17.35 cm.	112
Figura 5.41 a) Traço do UHR-PC-OTDR para diferentes comprimentos de onda dentro da rede dispersiva. b) Dispersão cromática induzida de -43.8 ps/nm.	112

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Evolução dos sistemas de comunicação por fibra óptica [1]	27
Tabela 4.1 Características da UWS	71
Tabela 4.2 Razão de extinção do SOA para dois comprimentos de onda	73
Tabela 4.3 Características do SOA	73
Tabela 4.4 Características do gerador de atraso digital	74
Tabela 4.5 Características técnicas do detector de fótons únicos	74
Tabela 4.6 Características técnicas do TDC	75

Lista de Acrônimos

AirPON	<i>Aircraft Passive Optical Network</i>
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
AWG	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPF	<i>Band Pass Filter</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CMOS	<i>complementary metal-oxide-semiconductor</i>
CO	<i>Central Office</i>
CRN	<i>Coherent Rayleigh Noise</i>
CW	<i>Continuous Waveform</i>
DDG	<i>Digital Delay Generator</i>
DSF	<i>Dispersion Shifted Fiber</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
EWAN	<i>External Wavelength Adaptation Module</i>
FC	<i>Fiber Channel</i>
FC/APC	<i>Ferrule Connector/Angled Physical Contact</i>
FC/PC	<i>Ferrule Connector/Physical Contact</i>
FDR	<i>Frequency Domain Reflectometry</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
FTTH/B	<i>Fiber To The Home/Building</i>
FTTX	<i>Fiber To The X</i>
FWHM	<i>Full-width half-maximum</i>
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
HDR-PC-OTDR	<i>High Dynamic Range Photon Counting OTDR</i>
HD-TV	<i>High Definition Television</i>
InGaAs/InP	<i>Indium Gallium Arsenide / Indium Phospide</i>
IOR	<i>Index of Refraction</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
NA	<i>Numerical Aperture</i>

NEP	<i>Noise Equivalent Power</i>
NMS	<i>Network Management System</i>
OC	<i>Optical Coupler</i>
OFS-N	<i>Optical Fiber Sensor - Network</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
ONT	<i>Optical Network Terminal</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometry</i>
P2MP	<i>Point to Multipoint</i>
P2P	<i>Point to Point</i>
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
PG	<i>Pulse Generator</i>
POLAN	<i>Passive Optical Local Area Network</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
RN	<i>Remote Node</i>
SAN	<i>Storage Area Networks</i>
SCSI	<i>Small Computer System Interface</i>
SDM	<i>Spatial Division Multiplexing</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
SPAD	<i>Single Photon Avalanche Diode</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDC	<i>Time to Digital Converter</i>
TDM-PON	<i>Time Division Multiplexing-Passive Optical Network</i>
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
TLS	<i>Tunable Laser Source</i>
UHR-PC-OTDR	<i>Ultra High Resolution Photon Counting OTDR</i>
UWS	<i>Ultra Wideband Source'</i>
VDSL	<i>Very-High-Bit-Rate Digital Subscriber Line</i>
VHDL	<i>VHSIC Hardware Description Language</i>
VOA	<i>Variable Optical Attenuator</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WDM-PON	<i>Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network</i>
-OTDR	<i>Photon Counting Optical Time Domain Reflectometry</i>