



Djeisson Hoffmann Thomas

**Otimização do Desempenho de Amplificadores a Fibra
Dopada com Érbio para Operação em Redes Ópticas WDM**

Tese de Doutorado

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

Orientador: Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro

Abril de 2007



Djeisson Hoffmann Thomas

**Otimização do Desempenho de Amplificadores a Fibra
Dopada com Érbio para Operação em Redes Ópticas WDM**

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

Jean Pierre von der Weid
Orientador
PUC-Rio

Eunézio A. de Souza
Universidade Presbiteriana Mackenzie

Anderson S. L. Gomes
UFPE

Maria Cristina Ribeiro Carvalho
PUC-Rio

Luis Carlos Blanco Linares
PUC-Rio

José Eugênio Leal
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de abril de 2007

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

Djeisson Hoffmann Thomas

Graduou-se em Engenharia Elétrica, em 2002, pela Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul. No mesmo ano, fixou-se no Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, onde, em 2003, concluiu o seu mestrado em Telecomunicações, na área de Eletromagnetismo Aplicado, sub-área Optoeletrônica. Desde então desenvolve pesquisa em Optoeletrônica, com especial interesse no comportamento dinâmico dos amplificadores à fibra dopada com Érbio (EDFAs).

Ficha Catalográfica

Thomas, Djeisson Hoffmann

Otimização do Desempenho de Amplificadores a Fibra dopada com Érbio para Operação em Redes Ópticas WDM / Djeisson Hoffmann Thomas; orientador: Jean Pierre von der Weid. – 2007.

158 f.: il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Comunicações ópticas. 3. Multiplexação por divisão de comprimento de onda. 4. Amplificador à fibra dopada com érbio. 5. Controle de ganho. 6. Laser em anel. 7. Tráfego de pacotes. 8. Amplificadores em cascata. Weid, Jean Pierre von der. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha mulher Lilian...

... e aos meus pais, Pedro e Darci, e irmãos, Felipe e Danieli.

Agradecimentos

Ao Prof. Jean Pierre von der Weid, pela orientação e parceria na realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

À minha mulher Lilian, pela compreensão, incentivo, carinho, amor, amizade e cumplicidade.

Aos meus pais, Pedro e Darci, pelo carinho, amor, amizade e por jamais medirem esforços para que eu alcançasse os meus objetivos.

Aos meus irmãos, Felipe e Danieli, pela amizade e companheirismo.

Ao Prof. Nelson J. Schuch, pela amizade e ensinamentos pessoais.

Aos professores do CETUC, pela amizade e ensinamentos pessoais.

Aos funcionários do CETUC, do Departamento de Engenharia Elétrica e às secretárias Amália e Mônica, pela amizade e apoio técnico.

Aos amigos e colegas de laboratório Giancarlo, Alexandre, Claiton, Luis Carlos, Márcia, Mauro, Guilherme Temporão, Guilherme Xavier, Thiago, Andy, Janaína, Marçal, Breno, Rogério, Gustavo, Daniela e Douglas, pela amizade e parceria.

Aos demais amigos do CETUC, ex-colegas ou "conterrâneos", e aos amigos do CPTI/Petrobrás, pela amizade e parceria.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Thomas, Djeisson Hoffmann; Weid, Jean Pierre von der. **Otimização do Desempenho de Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio para Operação em Redes Ópticas WDM**. Rio de Janeiro, 2007. 158p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nas redes ópticas que contém EDFAs (amplificadores à fibra dopada com Érbio), a característica variável do tráfego faz com que a potência de entrada do amplificador oscile, causando rápidas flutuações de ganho que podem inviabilizar a transmissão de dados nos canais WDM (multiplexados por divisão de comprimento de onda) co-propagantes. As variações de tráfego podem ser lentas, quando originadas pela adição ou remoção de canais WDM em qualquer nó da rede (*roteamento* dos canais WDM), ou rápidas, quando causadas pela transmissão aleatória de pacotes ou rajadas de dados através da rede. Logo, para alcançar uma alta qualidade de transmissão é necessário garantir a operação estável do EDFA, independentemente da natureza das variações de sua potência de entrada. Por isto, nós otimizamos o desempenho da *técnica da oscilação laser em anel* para controlar o ganho do EDFA, empregando dois comprimentos de onda espectralmente opostos, um acima e outro abaixo da banca C. A partir da ótima estabilidade de ganho alcançada com o emprego desta técnica de controle em uma unidade amplificadora, implementamos um sistema de armazenamento de sinais ópticos com ótimo desempenho e mostramos como minimizar as flutuações de ganho acumuladas após muitos EDFAs em cascata, tornando os enlaces ópticos de longo alcance mais eficientes.

Palavras-chave

Comunicações Ópticas; Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda; Amplificador à Fibra Dopada com Érbio; Dinâmica de ganho; Controle de ganho; Laser em anel; Tráfego de Pacotes; Amplificadores em cascata; Memórias totalmente ópticas; Linhas de atraso ópticas.

Abstract

Thomas, Djeisson Hoffmann; Weid, Jean Pierre von der. **Performance Optimization of the Erbium-Doped Fiber Amplifiers for Operation in Optical WDM Networks**. Rio de Janeiro, 2007. 158p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In optical networks containing EDFAs (Erbium-Doped Fiber Amplifiers), the variable traffic characteristic lead the input power to the amplifier to oscillate and cause fast time-dependent gain fluctuations that can impair the transmission of data on co-propagating WDM (Wavelength Division Multiplexing) channels. Traffic variations can be slow, when originated by add or drop of WDM channels at any network node (WDM routing), or fast, when come from random transmission of packet/burst data through the network. Consequently, to reach a high quality transmission it is necessary to ensure a stable EDFA operation, regardless the nature of its input power variations. Therefore, we optimized the performance of the *ring-laser technique* to clamp the EDFA gain, using two spectrally opposite lasing wavelengths, one above and another below the C-band. Based on the excellent gain stability reached with the employment of this gain control technique over one amplifier unit, we assembled a high-performance all-optic buffer memory and showed how to minimize the accumulated gain fluctuations after many cascaded EDFAs, enabling more efficient long distance optical links.

Keywords

Optical Communications; Wavelength Division Multiplexing; Erbium-Doped Fiber Amplifier; Gain Dynamics; Gain Control; Ring Laser; Packet Switching Traffic; Cascaded Amplifiers; Optical Memories; Optical Delay Lines.

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Apresentação do Trabalho	21
2	Fundamentos da Amplificação Óptica em Fibras Dopadas com Érbio e Estudo da Viabilidade de um Sistema de Controle de Ganho	24
2.1	Equações de Taxa para um Sistema <i>Laser</i> de Três Níveis de Energia	25
2.2	Dinâmica das Populações de Íons de um EDFA	29
2.3	Estudo da Viabilidade de um Sistema de Controle de Ganho	35
3	Eficiência de um EDFA e seu Emprego em Linhas de Atraso	42
3.1	Princípio da Conservação de Energia	42
3.2	Eficiência de Conversão de Potência e Saturação do Amplificador	45
3.3	Emissão Espontânea Amplificada (<i>ASE</i>) e Figura de Ruído (<i>NF</i>)	47
3.4	Estudo Qualitativo das Oscilações de Relaxação	51
3.5	Linhas de atraso por meio de anéis recirculantes	55
3.6	Figura de Ruído de Amplificadores em Cascata	61
4	Características Estáticas e Respostas do EDFA à Realocação de Canais da Rede Óptica	64
4.1	Montagem Experimental Realizada para Estudar a Resposta do EDFA à Realocação de Canais da Rede Óptica	65
4.2	Características Estáticas e Respostas do EDFA à Realocação de Canais da Rede Óptica	68
4.3	Considerações Finais	85
5	Comportamento Dinâmico de um EDFA com Ganho Controlado sob Tráfego de Pacotes	86
5.1	Montagem Experimental Realizada para Estudar a Resposta de um EDFA ao Tráfego de Pacotes	87

5.2	Respostas de um EDFA ao Tráfego de Pacotes	89
5.3	Considerações Finais	95
6	Flutuações Dinâmicas de Ganho ao longo de uma Linha de EDFAs sob Tráfego de Pacotes	97
6.1	Montagem Experimental Realizada para Estudar os Efeitos Acumulados ao Longo de uma Linha de EDFAs	98
6.2	Efeitos Acumulados ao Longo de uma Linha de EDFAs	102
6.3	Considerações Finais	108
7	Metodologia de Cálculo da BER e da Penalidade de Potência de um Pacote	110
7.1	Metodologia de Cálculo da BER Correspondente a um Pacote	111
7.2	Forma Alternativa de Obter a Penalidade de Potência do Pacote	113
7.3	Comparação entre os Valores de Penalidade de Potência de um Pacote Obtidos a partir de Dois Métodos Distintos	116
8	Otimização do Desempenho do EDFA num Sistema Óptico de Armazenamento de Pacotes por Linha de Atraso	122
8.1	Sistema de Armazenamento de Pacotes por Linha de Atraso	124
8.2	Flutuações de Ganho do Sistema Óptico de Armazenamento de Pacotes por Linha de Atraso	126
8.3	Considerações Finais	133
9	Conclusão	135
10	Referências Bibliográficas	140
	Apêndice A	145

Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama dos níveis de energia correspondente a um sistema de três níveis	26
Figura 2 – Configurações para controle de ganho	36
Figura 3 – Evolução do primeiro ciclo de uma oscilação de relaxação	52
Figura 4 - Evolução da inversão de população $N(t)$ e do número de fótons da cavidade $n(t)$ para um <i>laser</i> hipotético	54
Figura 5 – Linha de atraso por anel recirculante	56
Figura 6 – Controle de ganho proposto e experimento para medir a BER	66
Figura 7 – Ganho em regime de pequenos sinais para $\lambda_{\text{FBG}} = 1528 \text{ nm}$	69
Figura 8 – Ganho em regime de pequenos sinais para $\lambda_{\text{FBG}} = 1564 \text{ nm}$	70
Figura 9 – Variação espectral do ganho para $\lambda_{\text{FBG}} = 1528 \text{ nm}$	71
Figura 10 – Variação espectral do ganho para $\lambda_{\text{FBG}} = 1564 \text{ nm}$	71
Figura 11 – Ganho e figura de ruído do EDFA + dispositivos do controle para $\lambda_{\text{FBG}} = 1528 \text{ nm}$	73
Figura 12 – Ganho e figura de ruído do EDFA + dispositivos do controle para $\lambda_{\text{FBG}} = 1564 \text{ nm}$	73
Figura 13 – Ganho e variações de ganho para ambos os conjuntos de redes de Bragg	75
Figura 14 – Oscilações de relaxação	77
Figura 15 – Ressonância entre as oscilações de relaxação e as variações dinâmicas da potência de entrada do EDFA para $\lambda_{\text{FBG}} = 1528 \text{ nm}$	79
Figura 16 – BER em função da frequência das variações dinâmicas da potência de entrada do EDFA para $\lambda_{\text{FBG}} = 1528 \text{ nm}$	80
Figura 17 - Ressonância entre as oscilações de relaxação e as variações dinâmicas da potência de entrada do EDFA para $\lambda_{\text{FBG}} = 1564 \text{ nm}$	81
Figura 18 - BER em função da frequência das variações dinâmicas da potência de entrada do EDFA para $\lambda_{\text{FBG}} = 1564 \text{ nm}$	82
Figura 19 – Comparação entre as penalidades de potência causadas pela excitação ressonante	84

Figura 20 – Montagem experimental realizada para o estudo da resposta do EDFA ao tráfego de pacotes	87
Figura 21 – Flutuações de ganho induzidas em λ_{prova} em virtude da propagação de um pacote de 5 μs de largura no canal de 1532 nm	89
Figura 22 – Dependência espectral das flutuações de ganho	91
Figura 23 - (a) Depleção da potência dos pacotes em $\lambda = 1532$ nm e (b) Pacotes amplificados com atrasos diferentes	92
Figura 24 – Depleção da potência de pacotes em λ_{prova} em função do tamanho dos pacotes transmitidos simultaneamente em $\lambda = 1532$ nm	94
Figura 25 - Montagem experimental implementada para a medida das flutuações dinâmicas de ganho ao longo de uma linha de EDFAs	98
Figura 26 - Ganho e variações de ganho do EDFA em função da atenuação no caminho de realimentação	101
Figura 27 - Potência detectada em λ_{prova} correspondente à propagação de pacotes e do ruído de ASE	102
Figura 28 – Ganho dos amplificadores da linha	103
Figura 29 – Flutuações de ganho em λ_{prova} para o primeiro, terceiro, quinto e sexto EDFAs da linha	104
Figura 30 - (a) Flutuações de ganho de pico-a-pico em λ_{prova} para os 6 primeiros amplificadores da linha; (b) Aumento e depleção máximos de ganho correspondentes em cada EDFA	106
Figura 31 - Curva da BER média de referência para $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm	114
Figura 32 - Curva da BER média de referência para $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm	114
Figura 33 – Valores de penalidade de potência de pacotes de 1,25 μs em λ_{prova} para $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm	117
Figura 34 - Valores de penalidade de potência de pacotes de 2,5 μs em λ_{prova} para $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm	117
Figura 35 - Valores de penalidade de potência de pacotes de 5 μs em λ_{prova} para $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm	118
Figura 36 - Valores de penalidade de potência de pacotes de 1,25 μs em λ_{prova} para $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm	118

Figura 37 - Valores de penalidade de potência de pacotes de 2,5 μ s em λ_{prova} para $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm	119
Figura 38 - Valores de penalidade de potência de pacotes de 5 μ s em λ_{prova} para $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm	119
Figura 39 - Montagem experimental realizada para a medida das flutuações dinâmicas de ganho em um sistema óptico de armazenamento de pacotes por linha de atraso	124
Figura 40 – Flutuações de ganho de um EDFA em λ_{prova} para a transmissão de pacotes de diferentes tamanhos; (a) $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm (b) $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm	127
Figura 41 - Flutuações de ganho de um EDFA em λ_{prova} para a transmissão de pulsos simples e duplos com larguras de 5 e 1,25 μ s	129
Figura 42 – Flutuações de ganho do EDFA em λ_{prova} (linha cheia), depois da passagem de um pacote de 5 μ s em 1532 nm (linha pontilhada); (a) $\lambda_{\text{FBG}} = 1528$ nm (b) $\lambda_{\text{FBG}} = 1564$ nm	130
Figura 43 – Flutuações de ganho em λ_{prova} vs. Número de ciclos de armazenamento de pacotes de 5 μ s	131

Lista de Símbolos

- τ - Tempo de vida da emissão espontânea de um fóton;
- $\tau_{21,32}$ - Tempo de vida da emissão do fóton entre os níveis 2 e 1 e 3 e 2;
- R_{13} - Taxa de bombeio entre os níveis de energia 1 e 3;
- R_{31} - Taxa de emissão estimulada entre os níveis de energia 3 e 1;
- A_3^R - Taxa de emissão espontânea radiativa total relativa ao nível de energia 3;
- A_{32}^R - Taxa de emissão espontânea radiativa do nível de energia 3 para o 2;
- A_{31}^R - Taxa de emissão espontânea radiativa do nível de energia 3 para o 1;
- A_{32}^{NR} - Taxa de emissão espontânea não-radiativa do nível de energia 3 para o 2;
- W_{12} - Taxa de absorção estimulada entre os níveis de energia 1 e 2;
- W_{21} - Taxa de emissão estimulada entre os níveis de energia 2 e 1;
- A_2 - Taxa de emissão espontânea total relativa ao nível de energia 2;
- A_{21}^R - Taxa de emissão espontânea radiativa do nível de energia 2 para o 1;
- A_{21}^{NR} - Taxa de emissão espontânea não-radiativa do nível de energia 2 para o 1;
- ρ - Densidade total de íons do meio amplificador;
- N_1, N_2 e N_3 - Populações de íons dos níveis de energia 1, 2 e 3;
- $N_1(z,t), N_2(z,t), N_3(z,t)$ - Populações de íons dos níveis de energia 1, 2 e 3 em função da coordenada longitudinal z e do tempo t ;
- N_1^0, N_2^0 e N_3^0 - Condições iniciais das populações de íons dos níveis em $t < 0$;
- ϕ_p^{in} - Fluxo de fótons de bombeio na entrada do amplificador;
- h - Constante de Plank;
- ν_p - Frequência óptica do bombeio;
- ν_s - Frequência óptica do sinal;
- $\phi_s^{in,out}$ - Fluxo de fótons do sinal de entrada e saída;
- P_p^{in} - Potência de bombeio de entrada;
- P_s^{in} - Potência do sinal de entrada;
- P_s^{out} - Potência do sinal de saída;
- $P_p(z,t)$ - Potência de bombeio em função da coordenada longitudinal z e do tempo t ;

$P_s(z, t)$ - Potência de sinal em função da coordenada longitudinal z e do tempo t ;

λ_p - Comprimento de onda do bombeio;

λ_s - Comprimento de onda do sinal;

G - Ganho;

L - Comprimento físico da fibra óptica, que pode ser de um laço em uma linha de atraso;

P_{sat}^{out} - Potência de saturação de saída;

P_{sat}^{in} - Potência de saturação de entrada;

$P_{sat}(\lambda_{p,s})$ - Potência de saturação do EDFA em λ_p e λ_s ;

P_{ASE}^{out} - Potência de ASE direta na saída do amplificador;

$\Delta\lambda$ - Banda-passante em comprimentos de onda;

η_{sp} - Fator de emissão espontânea;

η_{sp}^{min} - Fator de emissão espontânea mínimo;

η_{eq} - Fator de ruído equivalente;

λ_k - k -ésimo comprimento de onda;

$\Delta\nu$ - Banda-passante em frequência óptica;

c - Velocidade da luz no espaço livre;

n - índice de refração da fibra;

F_o - Figura de Ruído;

F_o^{min} - Figura de Ruído mínima;

$\sigma_a(\lambda)$ - Seção de choque de absorção em λ ;

$\sigma_e(\lambda)$ - Seção de choque de emissão em λ ;

$\langle n_0 \rangle$ - Número médio de fótons do sinal de entrada;

η_p, η_k, η_s - Razão das seções de choque de emissão e absorção em λ_p, λ_k e λ_s ;

SNR_{IN} - Relação sinal-ruído na entrada;

SNR_{OUT} - Relação sinal-ruído na saída;

P_{SSE} - Densidade espectral de potência da SSE da fonte *laser*;

B_0 - Banda-passante do filtro óptico do receptor;

Γ_p - Fator de recobrimento em λ_p (igual a $(a_0/\omega_p)^2$ para dopagem confinada)

Γ_s - Fator de recobrimento λ_s (igual a $(a_0/\omega_s)^2$ para dopagem confinada)

a_0 - Raio do núcleo dopado;

ω_p - Raio do modo do bombeio;

ω_s - Raio do modo do sinal;

v_g - Velocidade de grupo;

α_p - Coeficiente de absorção em λ_p ;

α_s - Coeficiente de absorção em λ_s ;

P_0 - Potência de ruído equivalente na entrada do amplificador para uma banda $\delta\nu$;

p - Potência do sinal normalizada em relação à potência de saturação;

q - Potência de bombeio normalizada em relação à potência de saturação;

$\delta q, p$ - Fatores de correção de potência de bombeio e sinal;

t_1, t_2 - Constantes de tempo;

t_{rec} - Tempo de resposta;

t_{sat} - Tempo de saturação;

z - Coordenada que indica a direção longitudinal de propagação ao longo da fibra;

$N(t)$ - Condição da inversão de população no tempo t ;

N_{th} - Nível limiar à inversão de população;

$n(t)$ - Número de fótons da cavidade;

n_{ss} - Nível de operação estável do *laser* na cavidade;

γ_c - Taxa de decaimento da cavidade;

τ_c - Tempo de decaimento da cavidade;

ΔT - Largura do pulso de entrada;

t_{volta} - Período correspondente a uma volta na linha de atraso;

K - Número de voltas no laço ou de ciclos de armazenamento;

T - Perda correspondente a 1 volta no laço;

ε - Diferença residual entre o ganho e a perda dentro de um laço de uma linha de atraso;

M - Fator de mérito de uma linha de atraso;

B - Taxa de bits;

D - Coeficiente de dispersão médio da fibra;

N - Número de bits que pode ser armazenado em um determinado comprimento de fibra;

NF_S - Figura de ruído total do sistema de amplificadores em cascata;

α - Perda de propagação ou nível de atenuação no laço de realimentação;

SNR_0 - Relação sinal-ruído da entrada do sistema, imediatamente após o transmissor;

SNR_i - Relação sinal-ruído depois do amplificador i .

k – Número de amplificadores da linha;

B_1 – Taxa de erros de 1 pacote;

B_2 – Taxa de erros de um canal contínuo;

B_m – Taxa de erros média;

l_p – Largura de 1 pacote;

t_{p-p} – Período de repetição dos pacotes;

PP_{DEC} – Penalidade de potência por década;

$P_{BER=10^{-9}}$ – Potência recebida correspondente a $BER = 10^{-9}$;

$P_{BER=10^{-8}}$ – Potência recebida correspondente a $BER = 10^{-8}$;

PP_p – Penalidade de potência de 1 pacote;

P_{OUT} – Potência de saída do canal de prova;

P_{IN} – Potência de entrada do canal de prova;

P_{ASE-} - Potência correspondente ao ruído de ASE imediatamente antes do canal de prova;

P_{ASE+} - Potência correspondente ao ruído de ASE imediatamente depois do canal de prova;

P_{ASEt} - Potência correspondente ao ruído de ASE no canal de prova;

V_{max} – Valor máximo da tensão de saída no canal de prova para cada nível de atenuação no laço de realimentação;

$V_{\alpha-max}$ – Valor máximo da tensão de saída no canal de prova quando a atenuação é máxima;

V_{min} – Valor mínimo da tensão de saída no canal de prova para cada nível de atenuação no laço de realimentação;

V_{ASE} – Valor de tensão de saída no canal de prova correspondente ao ruído de ASE, para o amplificador ou ciclo em questão.

Lista de Siglas

AOGC – Controle de ganho totalmente óptico (*All-Optical Gain Control*);

ASE – Emissão Espontânea Amplificada (*Amplified Spontaneous Emission*);

BER – Taxa de Erro de Bit (*Bit-Error Rate*);

CW – Onda contínua (*Continuous Wave*);

DS – Dispersão deslocada (*Dispersion Shifted*);

EDFA – Amplificador à Fibra Dopada com Érbio (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*);

ESA – Absorção do Estado Excitado (*Excited State Absorption*);

FBG – Rede de Bragg (*Fiber Bragg Grating*);

GPIB – Interface por Barramento de Propósito Geral (*General Purpose Interface Bus*);

LAAR – Linha de Atraso por Anéis Recirculantes;

NF – Figura de Ruído (*Noise Figure*);

NRZ – Sinais do tipo *non-return to zero*;

OSA – Analisador de Espectro Óptico (*Optical Spectrum Analyzer*);

PCE - Eficiência de Conversão de Potência (*Power Conversion Efficiency*);

PDG – Ganho Dependente da Polarização (*Polarization Dependent Gain*);

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

PRBS – Sequência de Bits Pseudo-Aleatória (*Pseudo-Random Bit Sequence*);

RZ – Sinais do tipo *return to zero*;

SMF – Fibra Monomodo Padrão (*Single Mode Fiber*);

SNR – Relação Sinal-Ruído (*Signal-Noise Ratio*);

SSE - Emissão Espontânea da Fonte (*Source Spontaneous Emission*);

WDM – Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (*Wavelength Division Multiplexing*).